



Duarte Miguel Pinho da Silva Lelo Filipe

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Contribuição para a Otimização do Fabrico de Compressores Scroll

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira,
Professor Catedrático, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda, FCT-
UNL

Arguentes: Doutor Manuel Evaristo, FCT-UC



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

Contribuição para a Otimização do Fabrico de Compressores Scroll

Copyright © Duarte Miguel Pinho da Silva Lelo Filipe, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de endereçar o meu agradecimento ao meu orientador, o Professor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, pelo apoio demonstrado, empenho e partilha de conhecimento que contribuíram decisivamente para a realização deste estudo.

Ao Engº Nuno Guerin, da *Halla Visteon Climate Control*, pela oportunidade de realização deste trabalho. Agradeço à Engª Susana Salvador por todo o apoio e interesse demonstrado em todas as etapas do estudo. Agradecer ainda à Carla Monteiro e ao Eduardo Landim, técnicos de laboratório, pela ajuda na realização dos ensaios.

Agradeço à Professora Rosa Miranda e à Professora Carla Machado, pelo apoio e ajuda prestados nas diversas dificuldades que surgiram.

Agradeço à Professora Rosa Mendes, do Instituto Politécnico de Setúbal, pela ajuda e colaboração na realização dos ensaios de rugosidade.

Agradeço à Professora Teresa Vieira, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pela oportunidade de realização dos ensaios de Ultramicrodureza e *Scratch Tests*. Agradecer ainda à Professora Sofia Ramos e ao Dr. Evaristo Manuel pela disponibilidade e apoio prestados na realização dos ensaios.

Agradeço também ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães, técnicos do Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMI FCT-UNL, pela assistência que me prestaram nas diversas etapas do trabalho, e ainda aos colegas Patrick Inácio e Diogo Pereira.

Gostaria de agradecer especialmente à Geração 09, mas também à Geração 10, por todos estes anos de esforço, trabalho, convívio e companheirismo. Entre amigos tudo é mais fácil, e foi assim que passei este meu percurso académico

Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha Mãe e ao meu Irmão, que me apoiaram durante este percurso, que em muitos momentos foi difícil mas em que pude sempre contar com o seu apoio.

E finalmente dedico o meu maior agradecimento à minha Inês, que me fez acreditar, que me faz querer ser melhor e que muito contribuiu para este trabalho.

Resumo

A indústria automóvel é um meio extremamente competitivo, onde existe uma procura constante por novas soluções, sempre com a necessidade de redução de custos e otimização de recursos.

A *Halla Visteon Climate Control* (HVCC), que se trata de uma empresa líder na sua área de atuação, verificou a existência de problemas no processo de fabrico de alguns componentes do seu compressor *Scroll*, na sequência da alteração da matéria-prima para uma liga AA 6082-T6.

Na presente Dissertação realizou-se uma análise comparativa entre o material corrente e um novo material, AA 7075-T6, sem que tenham sido alterados quaisquer parâmetros do processo produtivo, tornando possível a avaliação do potencial de utilização do novo material.

Foram testados diversos parâmetros, tendo em conta as diferentes etapas do processo produtivo, como a dureza e a rugosidade superficial, o estado do revestimento aplicado por *Electroless* e o comportamento da camada obtida por Anodização.

A utilização da liga 7075 permitiu obter melhores resultados após as etapas de maquinagem, podendo contribuir para a eliminação dos problemas verificados nesta etapa do processo. No que diz respeito aos testes realizados após aplicação tanto dos revestimentos Ni-P, como da camada anodizada, os resultados revelaram-se semelhantes aos da liga 6082, sendo de destacar a melhoria de adesão verificada, comprovando assim o potencial de utilização deste material, especialmente num processo que possa ver os parâmetros otimizados para o mesmo.

Palavras-Chave

HVCC

AA 6082-T6

AA 7075-T6

Electroless

Anodização

Revestimentos Ni-P

Abstract

The automotive industry is a very competitive environment, where exists a constant search for new and competitive solutions, thinking always in cost reduction and resource optimization.

Halla Visteon Climate Control (HVCC), which is a leading company in its working sector, has verified the existence of several problems in the manufacturing process of certain components of their Scroll compressor due to the change of the raw material to an AA 6082-T6.

In this Master Thesis, was carried out a comparative analysis between the current material and the new one, AA 7075-T6, without making any changes in the process parameters, allowing the assessment of the new material's potential for production.

There were tested several parameters, taking into account the different stages of the production process, such as hardness, superficial roughness, the state of the Electroless coating and the analysis of the anodized layer.

The use of the AA 7075 showed better results after the milling operations and can contribute to the elimination of the problems found in this stage of the process. In what concerns to the tests carried out after applying the Ni-P coating or the anodized layer, the results were similar to the ones obtained from AA 6082, taking special notice to the improvement of the coating adhesion, thereby reinforcing the potential of use of the new alloy, specially in a process with optimized parameters.

Keywords

HVCC

AA 6082-T6

AA 7075-T6

Electroless

Anodized layer

Ni-P Coating

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Palavras-Chave.....	vii
Abstract	ix
Keywords	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	xxi
1 Introdução	1
2 Estado da Arte	3
2.1 Ligas de Alumínio.....	3
2.1.1 Classificação das Ligas de Alumínio	4
2.1.2 Ligas de Alumínio Termicamente Tratáveis	5
2.1.3 Corrosão	6
2.1.4 Forjamento	8
2.2 Revestimentos de Níquel.....	9
2.2.1 Constituintes do Banho	10
2.2.2 Propriedades do Revestimento	11
2.2.3 Zincagem.....	14
2.3 Anodização.....	15
2.3.1 Propriedades do Filme.....	16
2.3.2 Processos de Anodização	17
2.3.3 Características Atribuídas ao Substrato.....	18

2.3.4	Selagem	18
3	Definição do Problema	21
3.1	Compressor Scroll	21
3.2	Processo produtivo	22
3.2.1	Forjamento	23
3.2.2	Maquinagem	23
3.2.3	Revestimentos	23
3.2.3.1	Niquelagem	24
3.2.3.2	Anodização	25
3.3	Problemas no Processo Produtivo	25
3.4	Escolha do Material Alternativo	27
4	Procedimentos Experimentais	29
4.1	Ensaio Rugosidade	30
4.2	Ensaio Macro dureza	32
4.3	Choque Térmico	34
4.4	Teste Catódico	35
4.5	Análises Metalográficas	37
4.6	Teste de Adesão	39
4.7	Ensaio de Desgaste	40
4.8	Ensaio Ultramicro dureza	41
4.9	Ensaio <i>Scratch Test</i>	42
5	Resultados e Discussão	45
5.1	Ensaio Rugosidade	45
5.2	Ensaio Macro dureza	48
5.3	Choque Térmico	51
5.4	Teste Catódico	51

5.5	Análises Metalográficas	53
5.5.1	AA 6082 N	53
5.5.2	AA 7075 N1	54
5.5.3	AA 7075 N2	56
5.5.4	FS 7075 AN.....	57
5.6	Teste Adesão	58
5.7	Ensaio de Desgaste.....	60
5.8	Ensaio Ultramicrodureza.....	67
5.9	Ensaio <i>Scratch Test</i>	71
6	Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro.....	75
	Bibliografia	77
	Anexos.....	I
	A1 - Classificação dos tipos de Encruamento	III
	A2 - Classificação dos tipos de Tratamentos Térmicos	V
	A3 - Endurecimento por Precipitação	VII
	A4 – Ensaio de Rugosidade Estado Maquinado	IX
	A5 – Ensaio de Rugosidade Estado Final	XI
	A6 – Ensaio de Macroductura HRB Estado Maquinado.....	XV
	A7 – Programa em <i>Labview</i> para aquisição de dados do ensaio de desgaste.....	XVII
	A8 – Características do Sensor de Carga	XIX

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do processo de forjamento em matriz fechada. Adaptado de [6].	8
Figura 2.2: Esquema do processo de <i>Electroless</i> . Adaptado de [9].	9
Figura 2.3: Montagem do processo de Anodização. Adaptado de [5].	16
Figura 2.4: Estrutura típica do filme anodizado. Adaptado de [10].	17
Figura 3.1: Esquema de compressor <i>Scroll</i> . Adaptado de [14].	21
Figura 3.2: Esquema do processo produtivo.	22
Figura 3.3: Representação do OS após cada etapa produtiva: a) <i>As-Forged</i> , b) <i>As-Machined</i> , c) Estado Final.	22
Figura 3.4: Base do OS, denotando o efeito de material espalhado.	26
Figura 4.1: Montagem experimental do ensaio de rugosidade.	30
Figura 4.2: Representação das direções radial e transversal.	31
Figura 4.3: Representação dos vários pontos onde foram realizados os ensaios.	32
Figura 4.4: Montagem experimental do ensaio de macrodureza (Topo do OS).	32
Figura 4.5: Representação da determinação do valor de dureza.	33
Figura 4.6: Representação do OS: a) Base, b) Topo, c) Lateral.	33
Figura 4.7: Exemplo de peça onde se verificou aparecimento de bolhas.	34
Figura 4.8: Exemplo de OS Não-Conforme que apresenta arrancamento do revestimento.	35
Figura 4.9: Esquema Eletroquímico do Teste Catódico. Adaptado de [24].	35
Figura 4.10: Montagem experimental do Teste Catódico.	36
Figura 4.11: Exemplos de problemas de adesão do revestimento Ni-P.	37
Figura 4.12: Representação em corte das zonas a observar no OS e respetiva numeração.	38
Figura 4.13: Exemplo de amostra de OS após preparação.	38
Figura 4.14: Exemplo de amostra de FS após preparação.	39
Figura 4.15: Procedimento experimental para o Teste de Adesão.	39

Figura 4.16: Exemplos de Testes de Adesão: a) Peça conforme, b) Peça não-conforme.	40
Figura 4.17: Montagem experimental do Ensaio de Desgaste.	40
Figura 4.18: Montagem Experimental do Ensaio de Ultramicrodureza.	42
Figura 4.19: Esquema do ensaio Scratch Test. Adaptado de [27].	43
Figura 4.20: Montagem Experimental do Ensaio <i>Scratch Test</i>	43
Figura 5.1: Gráfico referente ao Ensaio de Rugosidade no Estado Maquinado, para a direção radial.	45
Figura 5.2: Gráfico referente ao Ensaio de Rugosidade no Estado Final, para a direção radial.	47
Figura 5.3: Gráfico referente ao Ensaio de Macroductura realizado na Base do OS.	49
Figura 5.4: Gráfico referente ao Ensaio de Macroductura realizado no Topo do OS.	49
Figura 5.5: Gráfico referente ao Ensaio de Macroductura realizado na Lateral do OS.	50
Figura 5.6: Representação da condição necessária para o ensaio de Macroductura.	50
Figura 5.7: Resultados do Teste Catódico: a) AA 6082 N, b) AA 7075 N1, c) AA 7075 N2	52
Figura 5.8: Topo AA 6082 N.	53
Figura 5.9: Base AA 6082 N.	53
Figura 5.10: Lateral AA 6082 N.	54
Figura 5.11: Topo AA 7075 N1.	54
Figura 5.12: Base AA 7075 N1.	55
Figura 5.13: Lateral AA 7075 N1.	55
Figura 5.14: Topo AA 7075 N2.	56
Figura 5.15: Base AA 7075 N2.	56
Figura 5.16: Lateral AA 7075 N2.	56
Figura 5.17: Topo FS 7075 AN.	57
Figura 5.18: Base FS 7075 AN.	57
Figura 5.19: Lateral FS 7075 AN.	58
Figura 5.20: Resultados do Teste de Adesão: a) AA 6082 N, b) AA 7075 N1, c) AA 7075 N2.	59

Figura 5.21:Ensaio realizado na liga 7075, por um período de 125 min.....	61
Figura 5.22: Ensaio realizado na liga 6082, por um período de 15 min.....	62
Figura 5.23: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 6082, por um período de 15 min.....	63
Figura 5.24: Ensaio realizado na liga 7075 por um período de 15 min.....	63
Figura 5.25: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga7075, por um período de 15 min.....	64
Figura 5.26: Ensaio realizado na liga 6082, por um período de 50 min.....	64
Figura 5.27: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 6082, por um período de 50 min.....	65
Figura 5.28: Ensaio realizado na liga 7075, por um período de 50 min.....	66
Figura 5.29: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 7075, por um período de 50 min.....	66
Figura 5.30: a) Amostra utilizada para os ensaios de ultramicrodureza, b) Exemplo de indentação realizada.	68
Figura 5.31: Gráfico da Dureza HV para a carga de 500 mN.	69
Figura 5.32: Gráfico da Dureza HV para a carga de 250 mN.	70
Figura 5.33: Amostra de 7075 utilizada no <i>Scratch Test</i>	71
Figura 5.34: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 6082, na localização 1...	71
Figura 5.35: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 6082, na localização 2...	72
Figura 5.36: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 7075, na localização 1...	72
Figura 5.37: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 7075, na localização 2...	73

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Designação das ligas de Alumínio. Adaptado de [2].	4
Tabela 2.2: Tipos de tratamento aplicados às ligas de Alumínio. Adaptado de [2].	5
Tabela 2.3: Resistência Mecânica das Ligas 2024, 6082 e 7075. Adaptado de [3].	6
Tabela 2.4: Resumo dos constituintes do banho e suas funções. Adaptado de [9].	10
Tabela 2.5: Relação entre teor em elemento de liga e densidade. Adaptado de [8].	12
Tabela 2.6: Propriedades mecânicas dos revestimentos Ni-P. Adaptado de [8].	13
Tabela 2.7: Dureza dos revestimentos Ni-P. Adaptado de [9].	14
Tabela 3.1: Parâmetros de corte. Informação recolhida junto da HVCC.	23
Tabela 3.2: Artigos científicos que versam sobre as ligas 2024 e 7075.	28
Tabela 4.1: Composição química da liga 6082. Adaptado de [16].	29
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas da liga 6082. Adaptado de [16].	29
Tabela 4.3: Composição química da liga 7075. Adaptado de [18].	30
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas da liga 7075. Adaptado de [18].	30
Tabela 4.5: Parâmetros de ensaio para o Teste Catódico.	37
Tabela 5.1: Valores de Rugosidade no Estado Maquinado, na direção transversal.	46
Tabela 5.2: Valores de Rugosidade no estado Final, na direção transversal.	47
Tabela 5.3: Parâmetros de teste e resultados dos Ensaios de Desgaste.	61
Tabela 5.4: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 1000 mN.	68
Tabela 5.5: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 500 mN.	69
Tabela 5.6: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 250 mN.	70

Abreviaturas, Siglas e Símbolos

AA 6082-T6	Designação para a liga de Alumínio 6082 alvo do tratamento T6
AA 7075-T6	Designação para a liga de Alumínio 7075 alvo do tratamento T6
<i>Datasheets</i>	Dados ou Informação Técnica
<i>Desmut</i>	Ataque Ácido
F_0	Pré-Carga
F_1	Carga Principal
F_T	Carga Total
FS	<i>Fixed Scroll</i>
HRB	Escala de Dureza <i>Rockwell B</i>
HVCC	<i>Halla Visteon Climate Control</i>
IADS	<i>International Alloy Designation System</i>
<i>Labview</i>	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
M^+	Iões Metálicos
OS	<i>Orbiting Scroll</i>
R	Agente Redutor
R_A	Rugosidade Média Superficial
Redox	Reação Química de Oxidação-Redução
<i>Smut</i>	Ataque Alcalino

1 Introdução

A presente Dissertação foi desenvolvida em parceria com a empresa *Halla Visteon Climate Control* (HVCC), situada em Palmela, que se trata de um dos principais fornecedores da indústria automóvel na sua área de atuação. A empresa fabrica, entre outros, compressores de ar-condicionado, que são produzidos em grande escala, obedecendo a requisitos muito exigentes, nomeadamente no que diz respeito a acabamentos superficiais.

A questão que motiva o presente estudo prende-se com uma alteração de matéria-prima no fabrico de componentes para o compressor *Scroll*, por parte da empresa HVCC. Esta substituição do material corrente por uma liga de Alumínio 6082, traduziu-se em diversas dificuldades no decorrer do processo produtivo. Dos problemas encontrados destacam-se as dificuldades verificadas no processo de maquinagem, uma vez que irão afetar processos subsequentes, como a aplicação de revestimentos à base de Níquel.

O objetivo desta Dissertação passa pela análise comparativa entre o material de que é atualmente produzido o compressor *Scroll*, a liga 6082, e um outro material, a liga 7075, que se trata de uma liga muito utilizada em componentes para a indústria automóvel e aeroespacial. De referir que as peças em análise se tratam do *Fixed Scroll* (FS) e do *Orbiting Scroll* (OS).

O estudo será feito mantendo inalteradas todas as operações e parâmetros do processo produtivo, de modo a que a alteração da matéria-prima seja realmente o foco da presente Dissertação. Irá ser efetuada uma caracterização dos componentes no seu **Estado Maquinado** (*As-Machined*) e no seu **Estado Final** (ou seja, após aplicação de revestimentos), tendo em atenção as características que influenciam diretamente a *performance* dos componentes em estudo.

O documento encontra-se estruturado em 6 Capítulos, iniciando-se no Capítulo 1 a apresentação dos objetivos, motivação e estrutura do presente estudo. No Capítulo 2 desenvolve-se o Estado da Arte, onde se procurou não só definir o conceito de liga de Alumínio e as diferentes características deste material, mas também introduzir o processo de deposição de revestimentos por *Electroless* e ainda o processo de Anodização. Já no Capítulo 3 é definido o problema que dá origem ao presente estudo, estando nele contida informação referente ao processo produtivo dos componentes em análise. O Capítulo 4 versa sobre os ensaios realizados, nomeadamente os procedimentos experimentais levados a cabo, enquanto no Capítulo 5 se apresentam e discutem os resultados dos referidos testes. Por último, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo e sugestões para desenvolvimentos e trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

2.1 Ligas de Alumínio

O Alumínio possui diversas propriedades que o tornam um material muito útil para diferentes aplicações industriais, ganhando ainda maior importância ao se verificar o seu preço relativamente baixo. É o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, encontrando-se combinado com outros elementos como o Ferro, o Oxigênio e o Silício, e uma vez que se trata de um material de baixa densidade ($2,70 \text{ g/cm}^3$) é largamente utilizado em indústrias como a automóvel ou a aeroespacial. Embora o Alumínio no seu estado puro apresente baixa resistência mecânica, quando ligado a outros elementos origina as ligas de Alumínio, podendo assim apresentar valores de resistência que ascendem aos 700 MPa [1].

Relativamente às suas propriedades, as ligas de Alumínio apresentam um valor de módulo de elasticidade baixo, cerca de 70 GPa, enquanto o valor do Aço corresponde a 210 GPa, denotando ainda uma baixa resistência mecânica quando em comparação com outros metais, podendo esta ser aumentada por aplicação de deformação mecânica ou por adição de um ou mais elementos de liga. Relativamente às suas propriedades químicas, a sua característica principal passa pela formação de um óxido superficial, a Alumina (composição química Al_2O_3), que se trata de um óxido duro, pouco dúctil, logo pouco tenaz. Este é o principal responsável pela resistência à corrosão do material em vários meios, formando-se naturalmente na presença de ar ou água, e ao se tratar de um mau condutor elétrico, confere esta propriedade ao material-base.

Nas ligas de Alumínio, são utilizados diversos elementos para a sua constituição, podendo estes serem classificados como **elementos principais** (Cu, Mn, Si, Mg e Zn) ou **elementos secundários** (Fe, Cr, Ni, entre outros) sendo esta classificação feita com base na preponderância dos elementos na matriz de Alumínio, bem como as propriedades associadas a cada um destes elementos [2].

2.1.1 Classificação das Ligas de Alumínio

A maioria das ligas tratam-se de soluções sólidas de um ou mais elementos dissolvidos numa matriz de Alumínio, classificando-se então de acordo com o principal elemento de liga, recorrendo a uma designação normalizada internacionalmente, IADS (*International Alloy Designation System*). Esta designação utiliza quatro dígitos, em que o primeiro indica o grupo que contém elementos de liga específicos, o segundo dígito indica modificações da liga original ou impurezas, que são conteúdos de outros elementos (utilizando-se o algarismo 0 quando se está perante a liga original) e os dois últimos dígitos identificam a liga ou indicam o grau de impureza do Alumínio. Como exemplo tem-se que a liga 1145, que apresenta uma pureza de 99,45%, enquanto a liga 1200 apresenta uma pureza de 99% [1] [3].

Apresentam-se na Tabela 2.1 as designações atribuídas às ligas de Alumínio, tendo em conta os principais elementos de liga.

Tabela 2.1: Designação das ligas de Alumínio. Adaptado de [2].

Série	Principal(is) Elemento(s) de liga
1xxx	Alumínio puro (> 99%)
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg, Si
7xxx	Zn
8xxx	Li, Sn, Fe, Cu e Mn
9xxx	Reservada para uso futuro

É possível identificar que as ligas de Alumínio se encontram divididas em dois grupos, dependendo do tipo de tratamentos que podem sofrer, assim os dois grupos são:

- As **ligas tratáveis termicamente**, que significa que poderão sofrer tratamentos térmicos para melhoria das suas propriedades mecânicas, incluindo-se neste grupo as séries: 2xxx, 6xxx e 7xxx (assinaladas a vermelho na Tabela 2.1). Uma vez que se trata do grupo de ligas com maior interesse para o presente trabalho, irão posteriormente ser apresentadas com maior detalhe;
- As **ligas não tratáveis termicamente**, que só poderão ser alvos de ações de endurecimento por deformação a frio, onde se incluem as restantes séries: 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx [3].

Consoante o tratamento efetuado, as ligas terão uma designação que as caracteriza, nomeadamente segundo o que consta na Tabela 2.2, onde se enumeram os tratamentos e pós-processamentos que podem ser aplicados às diferentes ligas de Alumínio.

Tabela 2.2: Tipos de tratamento aplicados às ligas de Alumínio. Adaptado de [2].

Tratamento	Descrição
F	Tal como fabricado
O	Recozimento e Recristalização
H	Encruamento
T	Tratamento Térmico

A título de exemplo, apresenta-se a designação AA 7075-T6, que se refere à liga 7075 que sofreu um tratamento de solubilização seguido de envelhecimento artificial (T6). Dada a relevância dos processos de **Encruamento** e **Tratamentos Térmicos** para melhoria das propriedades mecânicas das ligas, julga-se pertinente a consulta dos Anexos A1 e A2 para a obtenção de informação mais detalhada referente a estes processos.

2.1.2 Ligas de Alumínio Termicamente Tratáveis

Tal como foi referido, as ligas de Alumínio que podem ser submetidas a tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação, fazem parte das séries **2xxx** (Al-Cu, Al-Cu-Mg), **6xxx** (Al-Mg-Si) e **7xxx** (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu), podendo-se subdividir em dois grupos. No primeiro inserem-se as ligas com média resistência mecânica e boa soldabilidade (maioritariamente ligas das séries 6xxx e 7xxx, tendo como principais elementos Al-Si-Mg e Al-Zn-Mg, respetivamente). Já no segundo grupo integram-se as ligas que possuem alta resistência, tendo sido especialmente desenvolvidas para aplicações aeronáuticas (como é o caso de ligas das séries 2xxx e 7xxx, constituídas essencialmente por Al-Cu-Mg e Al-Zn-Mg-Cu) [3].

Descrevem-se assim, de forma sumária, as principais características das ligas termicamente tratáveis:

Série 2xxx – O principal elemento de liga deste grupo é o Cobre, contudo o Magnésio é também largamente utilizado. Uma das ligas mais importantes deste grupo é a 2024, cuja composição se trata de cerca de 4,5% Cu, 1,5% Mg e 0,6% Mn, e onde a sua resistência mecânica depende diretamente do efeito de solução sólida e precipitação, tendo em conta que o composto intermetálico, Al_2Cu , se trata do principal precipitado responsável pelo endurecimento por precipitação. Quando aplicado o tratamento T6, a liga 2024 pode apresentar uma resistência à tração na ordem dos 400 MPa;

Série 6xxx – As ligas pertencentes a esta série têm como principais elementos o Magnésio e o Silício, que ao se combinarem originam o composto intermetálico Mg_2Si , cuja precipitação provoca o endurecimento das ligas desta série. A liga 6082 é uma das mais importantes deste grupo, tendo como composição cerca de 1% Si, 0,8% Mg e 0,6% Mn, apresentando uma resistência à tração na ordem dos 290 MPa, quando alvo do tratamento térmico T6;

Série 7xxx – Os principais elementos de liga são o Zinco, o Magnésio e o Cobre, destacando-se o facto de o Zinco e o Magnésio se combinarem formando um composto intermetálico, o $MgZn_2$, que é o precipitado básico responsável pelo endurecimento das ligas quando tratadas termicamente. A solubilidade relativamente elevada do Zinco e do Magnésio na matriz de Alumínio torna possível o aparecimento de uma grande densidade de precipitados, alcançando-se assim um aumento considerável de resistência mecânica. A liga 7075 é uma das mais importantes deste grupo, tendo uma composição aproximada de 5,6% Zn, 2,5% Mg e 1,6% Cu, que ao ser submetida ao tratamento T6, adquire uma resistência à tração na ordem dos 500 MPa [1].

Na Tabela 2.3 apresenta-se um quadro-resumo onde estão presentes os valores típicos de resistência mecânica das ligas 2024, 6082 e 7075, quando sujeitas ao tratamento T6, que tira partido do fenómeno de **Endurecimento por Precipitação** para a melhoria das propriedades mecânicas das ligas de Alumínio. Por se tratar de um fenómeno relevante para o desenvolvimento deste trabalho, refere-se que se encontra presente no Anexo A3 informação sobre o referido processo.

Tabela 2.3: Resistência Mecânica das Ligas 2024, 6082 e 7075. Adaptado de [3].

Liga	Tensão obtida a 0,2% do alongamento total (MPa)	Tensão de Cedência (MPa)
2024	395	475
6082	285	310
7075	500	570

2.1.3 Corrosão

Existe a necessidade de abordar o fenómeno de corrosão, uma vez que este influencia diretamente o comportamento dos materiais quando em serviço, revelando-se extremamente importante para os processos aplicados aos materiais em estudo. Assim, o fenómeno de corrosão é geralmente definido como uma reação química ou eletroquímica entre um produto e o ambiente onde este se insere, conduzindo a uma deterioração ou mudança no material e, consequentemente, alteração das suas propriedades. Os principais tipos de corrosão são a corrosão uniforme, corrosão localizada (geralmente denominada por *Pitting Corrosion*) e a corrosão influenciada pelas propriedades metalúrgicas do próprio material [4].

O Alumínio quando exposto ao ar reage muito rapidamente com o Oxigénio, formando na sua superfície uma camada muito fina de óxido de Alumínio amorfo (Alumina), que se trata de uma camada muito compacta e aderente. Na presença de maiores níveis de humidade, esta camada torna-se mais espessa e na sua superfície é originada uma segunda camada, hidratada e por vezes mais porosa, de óxidos cristalinos e hidróxidos de Alumínio (como por exemplo: Boemite, $\gamma\text{AlO}(\text{OH})$, e Bayerite, $\alpha\text{Al}(\text{OH})_3$). Ao se encontrar coberto por uma camada de óxidos, o substrato está protegido contra a corrosão generalizada. No entanto ficará sujeito ao fenómeno de corrosão localizada (principalmente na forma de *Pitting Corrosion*), uma vez que, este tipo de corrosão pode resultar da deposição, na superfície do substrato, de espécies corrosivas presentes na atmosfera (como por exemplo cloretos ou dióxidos de Enxofre), comprometendo assim a integridade de certos pontos da camada de óxidos [5].

A maioria das técnicas e processos utilizados para alteração das propriedades de uma liga de Alumínio têm como objetivo a melhoria das suas propriedades mecânicas e físicas, contribuindo contudo para a degradação da sua resistência à corrosão. O Alumínio, tanto no seu estado puro como sob a forma das diferentes ligas, depende de uma película de Alumina, gerada através do processo de oxidação natural, para lhe conferir proteção contra o fenómeno de corrosão, caracterizando-se esta camada por ser transparente, estável na gama de pH (entre 4 a 9) e conferir ainda isolamento elétrico ao substrato.

Uma das características que influencia diretamente a capacidade de uma liga de Alumínio resistir ao fenómeno de corrosão, passa pelas suas características metalúrgicas, em que o seu efeito pode ser classificado em dois grupos. No primeiro tem-se os **efeitos de constituintes intermetálicos insolúveis**, podendo estes serem originados por impurezas (nomeadamente, por compostos de Ferro) e/ou através da adição de elementos de liga (como os compostos intermetálicos constituídos por Al-Cu-Mg, encontrados na série 2xxx). No segundo grupo incluem-se os **efeitos da precipitação de fases secundárias**, por aplicação de tratamentos térmicos posteriores, onde se destaca a precipitação intergranular. Nestes dois grupos considera-se que os compostos afetam negativamente a capacidade de resistência à corrosão de determinada liga, uma vez que funcionam como pontos de iniciação de corrosão, por interação galvânica com a matriz circundante. Importa ainda referir que o Cobre, enquanto elemento de liga principal em diversas séries (nomeadamente na série 2xxx), apresenta um fraco comportamento anticorrosivo, levando a que as ligas que contenham este elemento demonstrem igualmente esta característica [4].

2.1.4 Forjamento

O processo de forjamento insere-se nos processos tecnológicos de deformação plástica na massa de materiais metálicos, tratando-se de um processo que pode ser realizado a frio, a morno ou a quente. É um processo efetuado através da ação de forças de compressão aplicadas através de matrizes, tendo como principais aplicações o fabrico de componentes para a indústria automóvel e aeronáutica. Os componentes produzidos com recurso a este processo tecnológico apresentam um bom acabamento superficial, elevado controlo dimensional, excelentes propriedades mecânicas (nomeadamente boa resistência mecânica, tenacidade e resistência à fadiga), tendo associado um custo de produção relativamente baixo, eficiência em termos do aproveitamento da matéria-prima e consequente diminuição de desperdícios.

Apresenta-se na Figura 2.1 um esquema do processo de forjamento em matriz fechada, demonstrando as características acima referidas.

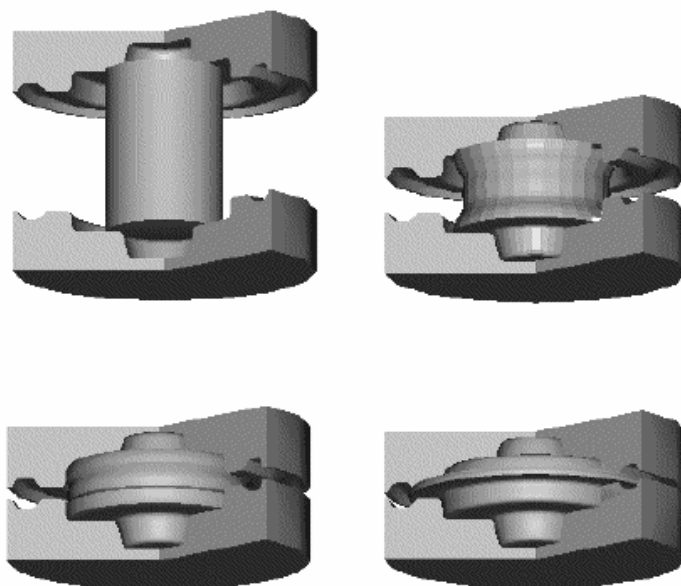


Figura 2.1: Esquema do processo de forjamento em matriz fechada. Adaptado de [6].

Entre as diversas variantes do processo de forjamento, destaca-se o **forjamento de precisão**, por se tratar de uma das etapas do processo produtivo dos componentes em estudo. Trata-se de um processo realizado em matriz fechada e utilizado na produção de grandes séries, posicionando o componente na sua forma final ou quase final, permitindo o recurso a tolerâncias de fabrico mais apertadas, e à eliminação de algumas etapas de maquinagem e retificação posteriores[7].

2.2 Revestimentos de Níquel

A deposição química de um metal, a partir de uma solução aquosa de um sal do referido metal, é realizada através de um mecanismo eletroquímico. Neste estão envolvidas tanto reações de oxidação como de redução (reações Redox), encontrando-se na base deste processo a transferência de elétrons entre as espécies químicas presentes na reação.

O termo *Electroless Plating*, que designa o processo de deposição de revestimentos por *Electroless*, foi inicialmente adotado para descrever o método de revestimento de substratos metálicos recorrendo a ligas de Níquel ou Cobalto, sem que fosse necessária a utilização de uma fonte de corrente elétrica externa ao processo. Com o decorrer do tempo, o termo tem sido subsequentemente ampliado de modo a abranger qualquer tipo de processo cuja finalidade seja a deposição de material, de modo contínuo e a partir de um meio aquoso.

O processo é caracterizado pela redução seletiva de iões metálicos (os iões são reduzidos a metal), reação que apenas se verifica na superfície de um substrato catalítico que se encontra imerso numa solução aquosa dos referidos iões metálicos, através da deposição contínua no substrato, por ação catalítica do próprio depósito. Uma vez que o depósito funciona como catalisador da reação, este processo de revestimento é descrito como sendo autocatalítico.

Apresenta-se, na Figura 2.2, um esquema do processo de deposição por *Electroless*, onde é possível verificar a ação do agente redutor (R), que ao ceder eletrões à reação acaba por ser oxidado, possibilitando que os iões metálicos (M^{n+}) sejam reduzidos a metal e que, por isso, sejam atraídos para o substrato, onde é verificada a deposição do mesmo [8].

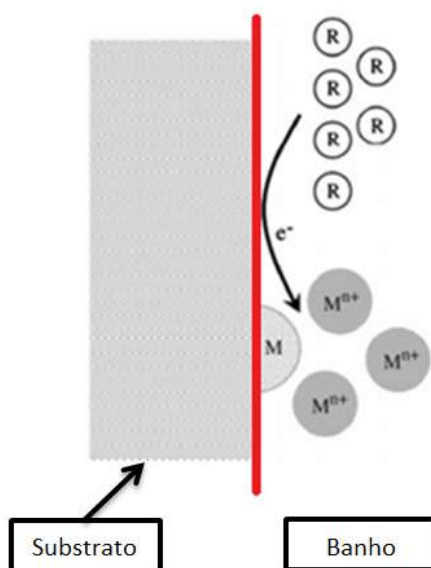


Figura 2.2: Esquema do processo de *Electroless*. Adaptado de [9].

A aplicação de revestimentos por *Electroless* tornou-se amplamente utilizada em diferentes meios industriais, devido às suas excelentes propriedades, como a resistência à corrosão e ao desgaste, ductilidade e soldabilidade. Destaca-se ainda que as ligas Níquel-Fósforo (Ni-P) e Níquel-Boro (Ni-B) representam cerca de 95% da composição dos revestimentos à base de Níquel utilizados em aplicações industriais [9].

2.2.1 Constituintes do Banho

Tal como já foi referido, o banho onde ocorre o processo de *Electroless* é constituído por diversos constituintes, apresentados na Tabela 2.4, sendo que os principais componentes serão descritos em seguida.

Tabela 2.4: Resumo dos constituintes do banho e suas funções. Adaptado de [9].

Constituinte	Principal Função
Iões Metálicos	Fonte de metal
Agente Redutor	Fonte de eletrões
Agente Complexante	Estabilizar a solução
Acelerador	Ativar do Agente Redutor
Regulador de pH	Regular do pH
Estabilizador	Estabilizar a solução
Agente de Molhagem	Aumentar da molhabilidade das superfícies

Agente Redutor: trata-se de um elemento, ou composto químico, que tem como função ceder um eletrão a outro elemento presente numa reação Redox, possibilitando que o processo seja não Eletrolítico, ou seja, não sendo necessário a presença de corrente elétrica externa;

Agente Complexante: os agentes complexantes são adicionados com o objetivo de evitar a decomposição da solução, bem como controlar a própria reação, de modo a que esta ocorra somente na superfície catalítica (substrato). Este tipo de agentes podem ser ácidos orgânicos ou os seus sais, adicionados no caso do processo de *Electroless*, com o intuito de controlar a quantidade de eletrões livres de Níquel disponíveis para a reação;

Acelerador: são constituintes geralmente adicionados ao banho em pequenas quantidades para aumentar a velocidade de deposição, aumentando a taxa de revestimento. A sua principal função é a de quebrar a ligação entre os átomos de Hidrogénio (H) e de Fósforo (P), na molécula de hipofosfito, facilitando a remoção do Fósforo e consequente absorção por parte do substrato (função descrita para a deposição de uma liga Ni-P);

Estabilizador: a adição de estabilizadores, também denominados de inibidores, quando adicionado em pequenas quantidades, irá tendencialmente aumentar a taxa de deposição e o brilho do revestimento.

Tanto os iões metálicos como o agente redutor são consumidos durante o processo, logo as concentrações no banho destes agentes diminuem continuamente, sendo um importante parâmetro neste processo. Uma vez que não existem ânodos disponíveis para manter constante a concentração de metal, nem nenhuma fonte externa para manter um fluxo constante de eletrões que se deslocam para o sistema (ao invés do que sucede no processo eletrolítico), torna-se necessária a reposição dos reagentes, para que o processo se mantenha contínuo e consistente. A frequência de reposição está dependente das gamas de concentração permitidas para a deposição de material.

A reação química (Redox) na qual se baseia o processo de *Electroless* não se limita à ligação de um depósito a um substrato, gerando igualmente produtos secundários que se acumulam no banho. Verifica-se então que, à medida que a concentração destes elementos aumenta, a qualidade do banho e dos depósitos tende a diminuir, concluindo-se que estes produtos secundários são responsáveis pelo curto tempo de vida-útil de cada banho, o que se trata de uma desvantagem quando comparado com o processo Eletrolítico [8].

2.2.2 Propriedades do Revestimento

Os revestimentos de Níquel aplicados por *Electroless* são utilizados em diferentes indústrias, devido à combinação entre resistência à corrosão e ao desgaste induzidas ao substrato e à capacidade de revestir componentes sem ter como restrição a sua geometria e dimensão, garantindo uma espessura uniforme. Dependendo da formulação química utilizada, as composições dos revestimentos poderão abranger um teor de 2 a 14% de P (para o caso de revestimentos Ni-P) e de 0,1 a 10% de B (em revestimentos Ni-B).

Os revestimentos de Ni-P caracterizam-se pela sua uniformidade, elevada dureza, relativa fragilidade e boas propriedades lubrificantes, tornando-se os mais relevantes para a maioria das aplicações industriais[8][9].

Apresentam-se assim as principais propriedades deste tipo de revestimentos, encontrando-se divididas em propriedades físicas e mecânicas.

Propriedades Físicas

Deposição Uniforme: trata-se de uma vantagem significativa deste processo, definindo-se como a capacidade de alcançar um revestimento com espessura uniforme quando aplicado em componentes com geometrias complexas. Funciona como uma vantagem relativamente ao processo Eletrolítico, ao permitir que arestas vivas e furos passantes sejam revestidos de igual forma e alcançando assim iguais valores de espessura.

Estrutura: no estado imediatamente após ter sido depositado, o revestimento à base de Níquel apresenta-se como uma liga metastável sobressaturada que, sob as condições de equilíbrio, consiste essencialmente em Níquel puro e num composto intermetálico, Ni_3P . O teor em P influencia diretamente a sua estrutura, sendo esta tipicamente cristalina para os depósitos com baixo teor em P e amorfa para elevados teores em P.

Densidade: num revestimento aplicado por *Electroless*, a densidade depende da distância interatômica e da quantidade de porosidades que este apresente. Para o caso dos depósitos constituídos pelas ligas Ni-P e Ni-B, a densidade é inversamente proporcional ao teor em P e B, assim quanto maior o teor destes elementos de liga, menor a densidade do depósito, ficando esta relação demonstrada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Relação entre teor em elemento de liga e densidade. Adaptado de [8].

Tipo de Revestimento	Teor do elemento de liga (%)	Densidade (g/cm^3)
Liga Ni-P	1 - 3	8,6
	5 - 7	8,3
	7 - 9	8,1
	>10	<8
Liga Ni-B	4 - 5	8,5
	5	8,3
	7	7,8

Propriedades Magnéticas: o comportamento magnético dos revestimentos está relacionado com a sua estrutura, assim identifica-se um comportamento ferromagnético para estruturas cristalinas e um comportamento não-magnético para revestimentos de estrutura amorfa.

Resistividade Elétrica: a resistividade elétrica das ligas de Níquel é maior do que o valor verificado pelo Níquel no seu estado puro, verificando-se ainda que o valor da resistividade elétrica, apresentado tanto pelos revestimentos Ni-P como Ni-B, aumenta com o acréscimo do teor dos elementos de liga.

Propriedades Mecânicas

Tensão de Cedência e Módulo de Elasticidade: este tipo de revestimentos revela-se bastante resistente mas frágil, apresentando baixa ductilidade, devendo-se este comportamento à estrutura cristalina e amorfa apresentada pela generalidade dos depósitos, fator que impede a deformação plástica.

Dureza: após deposição, os revestimentos de Ni-P e Ni-B apresentam uma dureza semelhante a algumas ligas de Aço, destacando-se o facto de estes valores poderem ainda ser melhorados por ação de tratamentos térmicos posteriores. Refere-se igualmente a relação de proporcionalidade inversa entre a dureza e o teor dos principais elementos de liga.

Resistência ao Desgaste: este tipo de revestimentos conferem ao substrato uma boa resistência ao desgaste, por apresentarem elevada dureza.

Resistência à Corrosão: a proteção contra a corrosão, conferida por este tipo de revestimentos, advém da baixa porosidade apresentada e da alta resistência verificada pelo Níquel, quando em contacto com maioria dos fluidos. Revela assim maior resistência à corrosão, quando comparada com depósitos aplicados por processos Eletrolíticos, uma vez que estes apresentam menor uniformidade e maior quantidade de porosidades[8][9].

De modo a sintetizar as suas propriedades mecânicas, apresentam-se, na Tabela 2.6, os valores de módulo de elasticidade e resistência à tração para depósitos de Ni-P, tendo em consideração a variação do teor em P. Na Tabela 2.7 apresentam-se os valores típicos de dureza, enfatizando a influência do teor em P.

Tabela 2.6: Propriedades mecânicas dos revestimentos Ni-P. Adaptado de [8].

Teor em P (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)
1 - 3	50 - 60	150 - 200
5 - 7	62 - 66	420 - 700
7 - 9	50 - 60	800 - 1100
10 - 12	50 - 70	650 - 900

Tabela 2.7: Dureza dos revestimentos Ni-P. Adaptado de [9].

Teor em P (%)	Dureza (HV0.1)
2 - 3	650
6 - 9	620
10 - 12	520

2.2.3 Zincagem

Uma característica importante neste tipo de revestimentos é a força de ligação que se pode desenvolver entre o substrato e o depósito. Para se atingirem elevados valores de adesão em ligações metal-metal, que se tratam das aplicações mais comuns deste processo, é necessário uma preparação exaustiva e rigorosa da superfície a revestir. Para tal é necessário a remoção de todos os contaminantes presentes no substrato e a eliminação de possíveis distorções superficiais, bem como a utilização de outros processos que visem a melhoria da adesão metal-revestimento, como é o caso do processo de Zincagem.

Para proteger as superfícies do substrato durante as diversas etapas do processo de *Electroless*, são utilizados depósitos de Zinco (denominando-se este processo intermédio por Zincagem). Estes protegem o substrato de uma possível reoxidação por exposição à atmosfera, durante operações de transporte/transferência dos componentes a revestir, permitindo que, aquando da deposição do revestimento à base de Níquel, a superfície do substrato se encontre livre de qualquer tipo de óxidos [8].

O processo baseia-se na formação de um depósito imerso de Zinco na superfície da liga de Alumínio por uma reação de deslocamento (*displacement reaction*) obtida a partir de uma solução alcalina de Zinco, onde o mecanismo que serve de base a este processo é explicado pela reação presente na Equação 2.1:



Como se verifica pela análise da Equação (2.1), a imersão de um substrato de Alumínio numa solução contendo óxidos de Zinco resulta na dissolução da Alumina, na geração de hidróxidos e na deposição (por substituição) de Zinco no substrato, que se trata do principal objetivo desta reação. Uma parte significativa do depósito de Zinco é dissolvido aquando da imersão no banho ácido onde se dá a aplicação do próprio revestimento à base de Níquel. Expõe-se assim uma superfície livre de quaisquer óxidos, facto que permite ainda a melhoria da ancoragem do revestimento de Níquel, uma vez que ao se removerem as partículas de Zinco da superfície, se contribui para o aumento da rugosidade superficial [8].

Dupla Zincagem

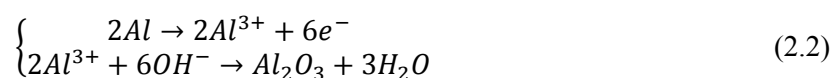
Uma abordagem que tem sido cada vez mais utilizada é a aplicação de duplo processo de Zincagem, onde a primeira camada de Zinco é retirada por imersão num banho constituído por 50% de ácido nítrico, sendo então depositada uma segunda camada. Esta abordagem tem como vantagem o facto de a primeira Zincagem ter uma função desoxidante, permitindo a remoção de inclusões de elementos de liga que se encontrem na superfície do substrato, enquanto a segunda camada pode ser ajustada de modo a produzir um fino depósito de Zinco, evitando assim presença residual de partículas do próprio Zinco na camada de Níquel depositada posteriormente, conferindo assim um melhor acabamento e adesão ao revestimento final [8].

2.3 Anodização

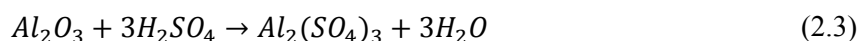
A Anodização é um importante processo industrial, que já vem sendo utilizado durante o último século, sendo frequentemente utilizada em substratos de Alumínio, conferindo assim ao material uma superfície com maior resistência à corrosão (ao tirar partido da grande afinidade entre as superfícies do Alumínio com o Oxigénio) resultando no crescimento artificial e acelerado de um filme de óxidos altamente resistente. O termo Anodização é aplicado a todos os revestimentos de conversão, devendo a sua denominação ao facto de o substrato ser utilizado como ânodo numa célula eletrolítica [10][11].

As reações químicas envolvidas no processo são as seguintes:

1- Reação eletroquímica de formação do óxido de Alumínio (Equação 2.2):



2- Reação química de dissolução do óxido em meio ácido (Equação 2.3):



Tal como referido, o substrato (que na maioria das aplicações se trata de uma liga de Alumínio) é o ânodo da reação, encontrando-se inserido numa solução eletrolítica ácida (com concentração e temperatura controladas), por onde se faz passar corrente elétrica. Este processo pode ser conseguido através da utilização de diversos eletrólitos, empregando variações nos parâmetros de funcionamento, tais como a composição do eletrólito, a presença de aditivos na solução, a temperatura, a diferença de potencial e intensidade de corrente elétrica [5] [11].

Apresenta-se na Figura 2.3 um esquema simplificado da montagem utilizada no processo de Anodização.

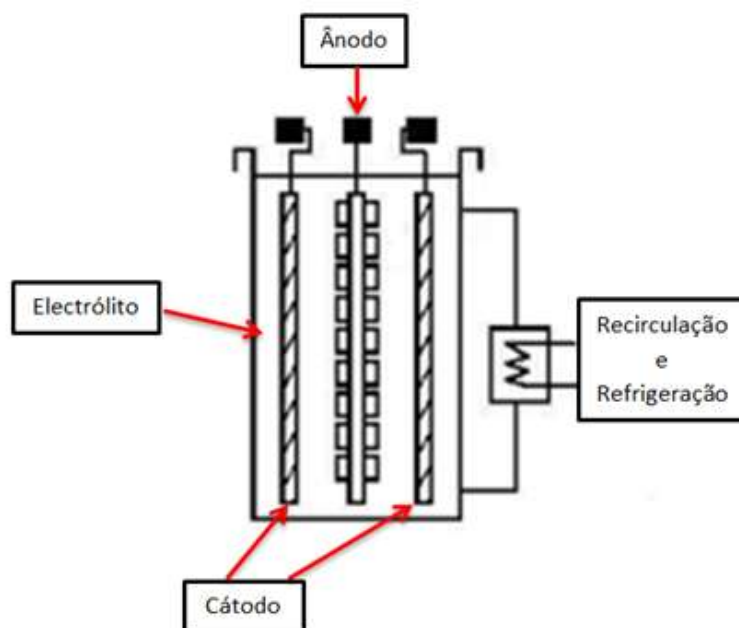


Figura 2.3: Montagem do processo de Anodização. Adaptado de[5].

2.3.1 Propriedades do Filme

É possível distinguir dois tipos de filme que dependem diretamente do eletrólito utilizado, sendo classificados como filmes **barreira** e filmes **porosos**. Os eletrólitos nos quais a película de óxido formada é completamente insolúvel, são os que produzem um filme do tipo barreira, englobando-se neste grupo soluções que respeitem um intervalo de pH entre 5 e 7, como o ácido bórico. Por outro lado, eletrólitos como o ácido sulfúrico, fosfórico ou crômico originam filmes de óxidos ligeiramente solúveis, considerando-se filmes do tipo poroso, que consistem numa espessa camada porosa exterior de Alumina sobre uma fina e compacta camada interior, sendo a espessura da camada interior controlada, como no caso dos filmes barreira, pela diferença de potencial da corrente aplicada na célula eletrolítica [12].

A película de óxidos é geralmente composta pelos dois tipos de filme, verificando-se que a primeira camada é mais fina (com uma espessura de poucas centenas de Angströms, Å), compacta e do tipo barreira, sendo adjacente ao substrato metálico, já a segunda camada trata-se de um filme poroso com uma estrutura colunar e cuja espessura pode atingir dezenas de micrómetros (μm).

Os poros presentes em qualquer filme de óxidos anodizado possuem um diâmetro de cerca de 250 Å e são originados pelo transporte de substâncias, desde o substrato até à superfície do filme, durante a contínua dissolução anódica. A superfície porosa pode ser conservada no seu estado natural, com o intuito de proporcionar uma superfície aderente para um revestimento orgânico (coloração – como por exemplo tingimento dos poros, conseguindo um revestimento protetor decorativo) ou ser preenchido com o intuito de criação de uma camada protetora autossuficiente, sendo para isso necessário o preenchimento dos poros, cujo processo se trata de um tratamento posterior à Anodização e se designa por **Selagem** [10].

Na Figura 2.4 é representada a estrutura típica deste tipo de revestimentos.

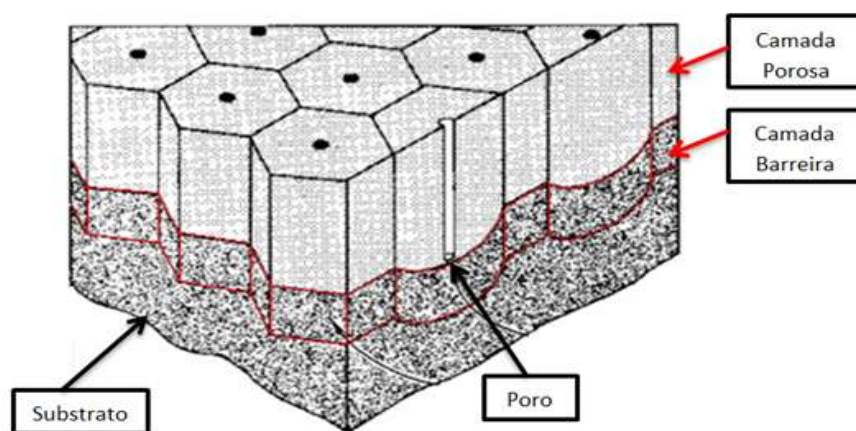


Figura 2.4: Estrutura típica do filme anodizado. Adaptado de [10].

Tal como se verifica pela Figura 2.4, os poros possuem uma estrutura tubular e fundo hemisférico, resultando do crescimento progressivo do óxido em círculos distribuídos de modo uniforme ao longo da superfície do substrato metálico.

2.3.2 Processos de Anodização

Existem três diferentes tipos de processos de Anodização: processo **Crómico**, processo **Sulfúrico** e o processo de **Hard Anodizing**, resultando a principal diferença no tipo de eletrólito utilizado, passando a ser descritos.

- **Processo Crómico**: utiliza ácido crómico como eletrólito e, devido à sua natureza, é utilizado na Anodização de componentes ou conjuntos rebitados ou soldados. A solução de ácido crómico utilizada contém um teor entre 3 a 10% de CrO_3 (trióxido de Crómio);

- **Processo Sulfúrico**: recorre-se a um eletrólito de ácido sulfúrico que, pelas suas propriedades corrosivas, não pode ser utilizado em componentes ou conjuntos com geometria complexa por não ser possível garantir a completa remoção do eletrólito, fator que iria afetar negativamente a *performance* do filme de óxidos;

- **Hard Anodizing**: processo de Anodização mais utilizado a nível industrial, recorrendo a um banho de ácido sulfúrico entre 10 a 20%, com ou sem aditivos. As principais diferenças entre este tipo e o processo sulfúrico residem nas condições de funcionamento, nomeadamente na temperatura de operação, na utilização de novos agentes no eletrólito e na diferença de potencial e intensidade de corrente elétrica presente no sistema. O processo de *Hard Anodizing* origina um filme de maior peso, quando comparado com os restantes processos [11].

2.3.3 Características Atribuídas ao Substrato

Dependendo do processo selecionado e das condições de funcionamento aplicadas, uma superfície anodizada confere ao substrato características específicas, como as seguintes:

- **Aumento da Resistência à Corrosão**: o revestimento anódico protege o substrato, servindo como barreira a possíveis agentes corrosivos. O óxido de Alumínio amorfo que compõe agora a superfície do substrato será alvo de um pós-tratamento de selagem, de modo a preencher os poros que compõe o filme anodizado, conferindo-lhe uma maior capacidade de resistência à corrosão;

- **Aumento da Resistência ao Desgaste**: consoante o processo utilizado, a Anodização permite a produção de revestimentos que variam entre os 20 μm e os 100 μm de espessura. Atendendo à dureza característica deste tipo de óxidos e com as espessuras de filme enunciadas, garante-se uma maior resistência ao desgaste quando comparando com o estado natural da superfície do substrato;

- **Isolamento Elétrico**: o facto de o óxido de Alumínio ser um material dielétrico, confere isolamento elétrico ao substrato;

- **Melhoria da Aparência**: os revestimentos anódicos são geralmente utilizados como acabamento final ou sempre que é necessário preservar um padrão induzido mecanicamente [11].

2.3.4 Selagem

Quando é utilizado um filme anodizado como camada autossuficiente, ou seja, sem adição de qualquer outro elemento, é necessário proceder a um pós-tratamento de Selagem para preenchimento dos poros restantes, estabelecendo deste modo uma camada barreira de maior espessura.

No processo de Selagem recorrem-se a sais inertes ou inibidores de corrosão para o preenchimento dos poros, que é conseguido através da conversão parcial do óxido de Alumínio (Alumina), constituinte do revestimento anódico, num hidróxido de óxido de Alumínio (Boemite: $\gamma AlO(OH)$). Os principais tipos de tratamento por Selagem incluem a coloração, através de corantes orgânicos, por imersão do substrato numa solução de água a ferver juntamente com sais de Níquel, fosfato ou outros aniões de sal. Entre os inibidores de corrosão incluem-se o Cobalto, Molibdato e o Lítio [10][11].

3 Definição do Problema

3.1 Compressor Scroll

Entre os produtos fabricados pela HVCC destaca-se o modelo *E-Compressor*, que se trata de um produto concebido especificamente para equipar veículos ligeiros elétricos e híbridos. Neste modelo está incluído um compressor *Scroll* que é acionado por um motor elétrico autónomo, permitindo a refrigeração do habitáculo mesmo que o motor principal (responsável pelo fornecimento de potência às rodas) se encontre desligado [13].

O funcionamento de um compressor *Scroll* baseia-se na utilização de dois componentes principais: o *Fixed Scroll* (FS) e o *Orbiting Scroll* (OS). O seu ciclo de funcionamento é composto por três etapas: sucção, compressão e descarga, sendo este realizado através da variação contínua das câmaras de combustão, que possuem forma semelhante a meias-luas, variação que se deve ao movimento orbital realizado pelo OS em torno do FS.

Apresenta-se na Figura 3.1 um esquema simplificado deste tipo de compressores.

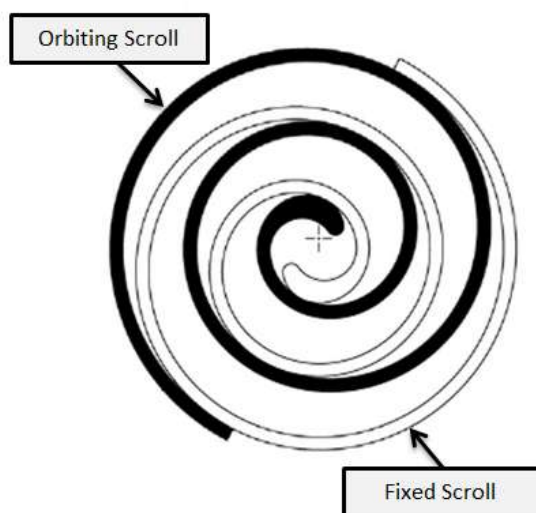


Figura 3.1: Esquema de compressor *Scroll*. Adaptado de [14].

As vantagens da utilização deste tipo de compressores residem no facto de, ao se recorrer a um número reduzido de componentes móveis, permite que o equipamento possua um baixo nível de ruído e vibração, alcançando elevada eficiência e fiabilidade que são características fundamentais atendendo ao tipo de veículos que são equipados por este modelo [14].

3.2 Processo produtivo

Os componentes em estudo, o *Orbiting Scroll* e o *Fixed Scroll*, são produzidos obedecendo à sequência produtiva que se encontra esquematizada na Figura 3.2, destacando-se o facto do processo produtivo ser comum aos dois componentes até se atingir a etapa de aplicação dos revestimentos. Nesta etapa verifica-se uma variação no tipo de revestimento aplicado a cada componente, cabendo o processo de Anodização aos FS enquanto é aplicado o processo de Niquelagem aos OS. Note-se que toda a informação que será apresentada no decorrer deste Capítulo resulta do conhecimento adquirido junto da HVCC.

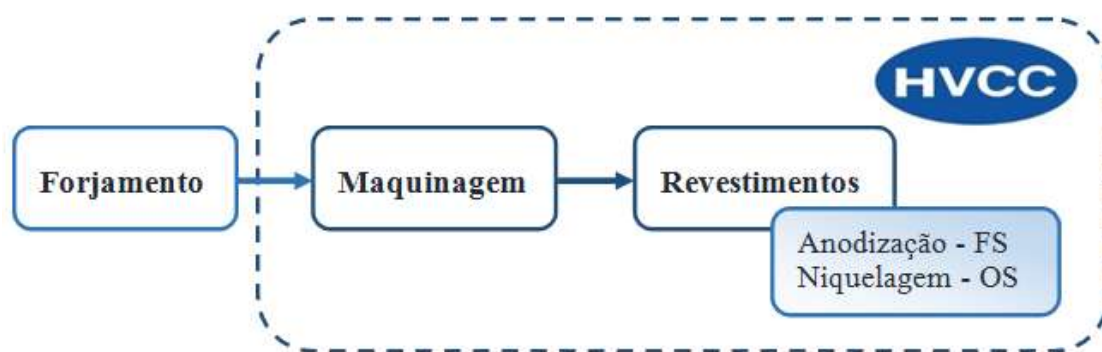


Figura 3.2: Esquema do processo produtivo.

Este tipo de componentes obedece a requisitos muito exigentes, nomeadamente no que diz respeito a tolerâncias dimensionais e geométricas, uma vez que compõe um conjunto móvel. A indústria automóvel é um meio extremamente competitivo, fator que por si só é sinónimo de rigor na execução de todos os seus produtos e constituintes, como é o caso do compressor de ar condicionado.

Apresenta-se, na Figura 3.3, o estado do OS após cada etapa do processo produtivo, respetivamente após forjamento (*As-Forged*), após maquinagem (*As-Machined*) e após aplicação do revestimento de Ni-P por *Electroless* (Estado Final).

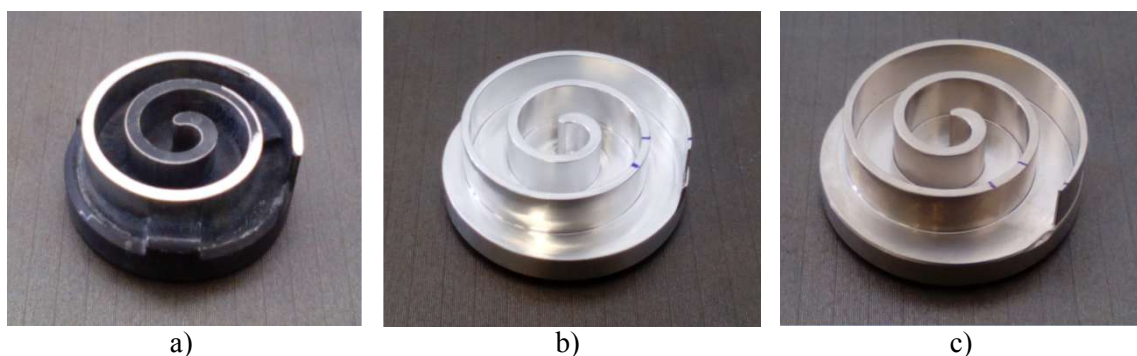


Figura 3.3: Representação do OS após cada etapa produtiva: a) *As-Forged*, b) *As-Machined*, c) Estado Final.

3.2.1 Forjamento

Relativamente ao processo de forjamento, a informação reunida corresponde somente à pesquisa bibliográfica presente no Estado da Arte (Capítulo 2), uma vez que não foi possível reunir qualquer documentação ou informação técnica relevante. É de notar, que a primeira operação do processo é realizada numa empresa exterior (*outsourcing*) por se tratar de um processo específico, requerendo elevado grau de especialização e *know-how*. Cabe assim à HVCC a realização das restantes operações do processo, ou seja, as operações de maquinagem e aplicação de revestimentos.

3.2.2 Maquinagem

Uma vez que a etapa anterior do processo se trata de forjamento de precisão, os componentes no estado *As-Forged* apresentam cotas próximo dos valores finais, implicando este facto que nas etapas de maquinagem subsequentes a quantidade de material a retirar seja reduzida.

O processo tecnológico utilizado para a maquinagem dos componentes é a **Fresagem**, por ser o mais adequado à configuração das peças, apresentando-se na Tabela 3.1 os parâmetros de corte referentes às etapas de maquinagem. É de referir que a **Op.10** diz respeito a operações executadas na base do componente, enquanto a **Op.20** se destina à maquinagem das restantes superfícies.

Tabela 3.1: Parâmetros de corte. Informação recolhida junto da HVCC.

Operação		Rotação (rpm)	Velocidade de Avanço (mm/min)
Op.10	Desbaste	25000	2000
	Acabamento	39000	5000
Op.20	Desbaste	25000	2000
	Acabamento	39000	5000

3.2.3 Revestimentos

O compressor *Scroll*, pelo seu princípio de funcionamento, implica o contacto entre as superfícies do FS e do OS, tal como foi representado na Figura 3.1, sendo então necessário ter em conta as propriedades tribológicas (Tribologia é a ciência que estuda a fricção, o desgaste e a lubrificação, que têm lugar em sistemas de contacto entre superfícies sólidas e em movimento relativo) do sistema aquando da seleção dos revestimentos a aplicar. Atendendo a que o componente móvel (OS) e o componente fixo (FS) são produzidos no mesmo material base (AA

6082) opta-se por utilizar superficiais com propriedades dissimilares, fazendo variar a sua rugosidade e dureza, de modo a que não se verifique um coeficiente de atrito elevado, que conduziria a uma elevada taxa de desgaste dos mesmos.

De modo a ultrapassar este condicionalismo, são utilizados revestimentos dissimilares (tal como foi referido no processo produtivo apresentado na Figura 3.2), cabendo ao OS um revestimento à base de Níquel (com uma espessura de $10\ \mu m$), enquanto se aplica ao FS o processo de Anodização, conferindo-lhe uma camada superficial de óxidos de Alumínio (com uma espessura de $20\ \mu m$). Esta diferença de valores de espessura é explicada pelo facto de, num sistema composto por materiais de diferentes durezas, a perda de material corresponder sempre ao metal mais macio, daí o aumento de espessura no revestimento do FS, uma vez que se trata da superfície mais macia.

3.2.3.1 Niquelagem

Tal como havia sido explicitado no Subcapítulo 2.2, o objetivo deste processo é a aplicação de um revestimento Ni-P, com baixo teor em P (entre 3 a 5%) de modo a conferir maior resistência ao desgaste e com uma espessura de $10 \pm 3\ \mu m$, sendo o depósito uniforme ao longo de todo o componente. Este processo obedece a uma sequência própria (*Nickel Coating Process Sequence* - designação atribuída pela HVCC), que será apresentada:

- 1- **Limpeza:** neste primeiro passo efetua-se o desengorduramento do componente;
- 2- **Ataque Alcalino (*Smut*):** tem como objetivo a dissolução do filme de óxidos superficiais, bem como a remoção de alguns elementos de liga presentes na superfície do componente. Durante o ataque alcalino (*alkaline etching*) são gerados subprodutos provenientes do substrato e que permanecem no banho, resultando na deposição na superfície do OS de alguns destes elementos. Estes originam a formação de novos tipos de óxidos, neste caso específico, óxidos de Silício (uma vez que o Silício se trata do principal elemento constituinte da liga do 6082), denominando-se este processo de deposição e formação de óxidos por *Smut*. Para esta etapa do processo recorrem-se a soluções de Hidróxido e Carboneto de Sódio [15];
- 3- **Ataque Ácido (*Desmut*):** nesta etapa o substrato é atacado pelos ácidos Sulfúricos e Fluorídricos, cabendo especificamente ao ácido Fluorídrico a função de dissolver a camada de óxido de Silício (promovida pelo processo de *Smut*). É de notar que este processo de *Smut* e *Desmut* contribui diretamente para o aumento da rugosidade superficial do OS, uma vez que os precipitados de Silício apresentam grandes dimensões e a sua remoção/dissolução gera vazios na superfície do componente, aumentando assim a capacidade de ancoragem do revestimento de Níquel;

- 4- **1ª Zincagem:** corresponde à deposição de uma fina camada de Zinco na superfície do substrato, tendo uma espessura inferior a $1\ \mu\text{m}$;
- 5- **Remoção da Zincagem:** ação que permite a remoção não só da camada de Zinco anteriormente depositada mas também de alguns elementos ainda presentes na superfície do componente;
- 6- **2ª Zincagem:** tal como na 1ª Zincagem, deposita-se uma camada de Zinco, de menor espessura, tratando-se do último passo na preparação da superfície;
- 7- **Níquel Strike:** trata-se de uma pré-deposição de Níquel, realizada por um período de $10\ \text{min}$, à temperatura de 30°C ;
- 8- **Electroless:** neste passo é aplicado o revestimento de Ni-P, com a espessura requerida. Para aplicação do depósito o componente é mergulhado no banho de *Electroless*, sendo esta operação realizada durante aproximadamente $27\ \text{min}$ e estando o banho a uma temperatura de 88°C ;
- 9- **Tratamento Térmico:** após o devido enxaguamento e secagem dos OS, estes são alvo de um tratamento térmico cujo objetivo passa pela estabilização do revestimento de forma a melhorar a sua adesão. O tratamento é realizado a uma temperatura de 150°C , durante um período de 2h .

3.2.3.2 Anodização

Este tipo de revestimentos, tal como foi referido no Subcapítulo 2.3, tem como objetivo o aparecimento de uma camada superficial de óxidos de Alumínio, de modo a proteger a superfície do substrato contra a corrosão e o desgaste. Esta camada tem como especificação uma espessura de $15 \pm 5\ \mu\text{m}$.

Apresenta-se então a sequência produtiva para o processo de Anodização:

- 1- **Limpeza:** a limpeza e desgorduramento do componente corresponde ao primeiro passo deste processo;
- 2- **Anodização:** etapa realizada recorrendo a ácido Sulfúrico como eletrólito, imergindo-se os componentes no tanque de Anodização por um período entre 50 a $80\ \text{min}$ e sendo realizado a uma temperatura de 15°C .

3.3 Problemas no Processo Produtivo

As principais dificuldades encontradas no processo produtivo estão relacionadas com as operações de maquinaria, influenciando negativamente as restantes etapas, estando estas diretamente relacionadas com a escolha pouco adequada do material utilizado para a produção dos principais componentes do compressor.

Como já havia sido referido, o material utilizado trata-se da liga de Alumínio 6082, que tem como principais características o facto de apresentar uma resistência mecânica moderada e um comportamento muito dúctil, quando comparado com ligas de outras séries. Estas características dificultam as operações de maquinagem, originando dois tipos de problemas:

- 1- Quando, em cada etapa de maquinagem, é necessário o aperto da peça na máquina-ferramenta esta apresenta deformações que alteram o posicionamento do próprio componente, dificultando as operações de corte por arranque de apara;
- 2- O arranque da apara não é efetuado de modo adequado, implicando que a apara não seja totalmente removida da superfície do componente, originando o aparecimento de “microssoldaduras” na superfície do mesmo, bem como o aparecimento de rebarba lateral. Estes dois fenómenos têm origem no tipo de ferramenta de corte utilizada que apresenta um ângulo de ataque inadequado para um material com esta ductilidade.

Os referidos problemas são responsáveis tanto pelo desgaste precoce da ferramenta de corte, como pela dificuldade em alcançar as tolerâncias geométricas e dimensionais requeridas (nomeadamente para atingir uma rugosidade superficial de $0,6\ \mu m$), bem como problemas na aplicação dos revestimentos à base de Níquel. Estes últimos encontram dificuldades na correta deposição e ancoragem da película de Ni-P devido ao acabamento superficial após maquinagem não ser o desejado, tal como é evidenciado na Figura 3.4 onde se observa o fenómeno de “material espalhado” e de defeitos superficiais. Uma vez que a superfície não se encontra conforme especificado, surgem dificuldades no processo de Niquelagem, nomeadamente nas etapas de *Smut* e *Desmut* que são essenciais para garantir uma boa adesão do revestimento.



Figura 3.4: Base do OS, denotando o efeito de material espalhado.

3.4 Escolha do Material Alternativo

Ao consultar as características do material atualmente utilizado, recorrendo unicamente a dados técnicos (*datasheets*) [16], por impossibilidade de utilização de informação da HVCC, foi possível concluir que a liga em questão não seria a mais adequada para o processo produtivo, tendo em conta a dureza e resistência mecânica apresentadas. Realizou-se então um levantamento de possíveis materiais alternativos, tendo sido apontadas as ligas 2024 [17] e 7075 [18] como ligas adequadas ao fabrico dos componentes em questão.

Uma vez selecionados os materiais alternativos, elaborou-se uma pesquisa sobre estudos afetos às diversas etapas presentes do processo produtivo da HVCC. Atribui-se especial atenção aos processos de Niquelagem e Zincagem, por se tratarem de técnicas específicas e em constante desenvolvimento (ao contrário do que sucede por exemplo com o processo de Anodização, que se trata de um processo consagrado e altamente difundido a nível industrial), aplicados às ligas em questão, apresentando-se assim, na Tabela 3.2, os artigos científicos analisados.

Tabela 3.2: Artigos científicos que versam sobre as ligas 2024 e 7075.

Referência	Título	Descrição
[19]	Resistência ao desgaste e à corrosão da liga de Alumínio 2024 revestida por uma camada Duplex Ni-P/Ni-B.	Os provetes revestidos por <i>Electroless</i> (comparado com provetes sem revestimentos) apresentam melhor resistência tanto ao desgaste como à corrosão, sendo estas características potenciadas pela utilização de pós-tratamentos térmicos.
[20]	Comportamento à fadiga de um substrato constituído pela liga 7075, revestido, por <i>Electroless</i> , de um depósito de Ni-P.	Os resultados dos ensaios verificam que, para a generalidade das condições/parâmetros de teste, a utilização do revestimento (com elevado teor em P) aumenta a resistência à corrosão por fadiga e denota melhores propriedades mecânicas do substrato.
[21]	Avaliação da resistência à fratura e as propriedades mecânicas da liga 7075-T6, com revestimento à base de Níquel (espessura entre 10 – 40 μm).	Demonstrou-se que o revestimento aplicado por <i>Electroless</i> proporciona ao conjunto um aumento significativo da resistência à fratura, bem como o aumento da tensão de cedência e da dureza, demonstrando ainda boa adesão ao substrato mesmo quando sujeito a tensões de tração superiores ao limite de elasticidade
[22]	Avaliação do efeito do revestimento Ni-P na resistência à corrosão da liga 7075-T6.	Os resultados indicam que a aplicação de um revestimento de Ni-P (com elevado teor em P) contribui para o aumento da resistência à corrosão por <i>Pitting</i> e eliminação do aparecimento do fenómeno de corrosão por esfoliação.
[23]	Efeito de pré-tratamentos e tratamentos térmicos na resistência ao desgaste da liga 7075-T6 revestida por <i>Electroless</i> com a liga Ni-B.	Avaliação de diferentes pré-tratamentos, como Zincagem e Níquel <i>Strike</i> . Os resultados revelam que a aplicação destes processos, aliados a pós-tratamentos térmicos, melhora a resistência ao desgaste do substrato.

4 Procedimentos Experimentais

Para alcançar os objetivos propostos para este trabalho, que passam pela análise comparativa entre componentes fabricados com recurso a duas ligas de Alumínio, foram realizados diversos testes e ensaios. Neste Capítulo apresenta-se uma breve descrição sobre os materiais testados, e em seguida abordam-se os ensaios realizados, focando sobretudo os equipamentos, parâmetros de teste e técnicas utilizados.

Refira-se que, numa primeira fase do estudo, se selecionaram dois materiais alternativos, as ligas 2024 e 7075 (mencionadas no Subcapítulo 3.4). Por não ter sido possível a produção de componentes na liga 2024, optou-se pela análise e comparação somente da liga 7075 com o material corrente.

Apresenta-se uma breve descrição da liga 6082, que se trata do material atualmente utilizado, referindo a sua composição química, representada na Tabela 4.1, bem como algumas das suas propriedades mecânicas, presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Composição química da liga 6082. Adaptado de [16].

Composição Química				
Elemento	Al	Si	Mg	Mn
Teor (%)	95,2 - 98,3	0,70 - 1,3	0,60 - 1,2	0,40 - 1,0

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas da liga 6082. Adaptado de [16].

Liga	Densidade (g/cm^3)	Dureza (HV)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão de Rotura (MPa)
6082	2,70	95	260	310

Tal como para o material corrente, apresenta-se a liga 7075, nomeadamente a sua composição química, na Tabela 4.3, e algumas das propriedades mecânicas, representadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.3: Composição química da liga 7075. Adaptado de [18].

	Composição Química			
Elemento	Al	Zn	Mg	Cu
Teor (%)	87,1 - 91,4	5,1 - 6,1	2,1 - 2,9	1,2 - 2,0

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas da liga 7075. Adaptado de [18].

Liga	Densidade (g/cm^3)	Dureza (HV)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão de Rotura (MPa)
7075	2,81	150	500	570

4.1 Ensaio Rugosidade

Com o intuito de avaliar a variação de rugosidade superficial com o material utilizado, foram realizados ensaios de rugosidade, onde se testaram OS no **Estado Maquinado** (um exemplar de cada material) e no seu **Estado Final** (um exemplar fabricado na liga 6082 e dois exemplares de 7075). As medições foram realizadas unicamente na base da espiral, devido a constrangimentos no posicionamento do equipamento, sendo este facto visível na Figura 4.1.

Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Qualidade do Instituto Politécnico de Setúbal, recorrendo ao aparelho *Mitutoyo Surftest SJ 201*, e utilizando a montagem experimental apresentada na Figura 4.1. Refere-se ainda que estes ensaios foram realizados segundo a norma ASME B46.1-2009 (atualização de 2002).



Figura 4.1: Montagem experimental do ensaio de rugosidade.

Procedeu-se primeiramente à calibração do equipamento, utilizando a superfície padrão fornecida pelo fabricante, seguidamente seleccionaram-se as condições de teste, nomeadamente o comprimento de amostragem (que se trata da distância percorrida pelo apalpador, no caso $2,5mm$) e escolheu-se como parâmetro a analisar a rugosidade média superficial (R_A). Uma vez que não foi possível garantir o correto posicionamento tanto dos componentes como do próprio equipamento, não foi efetuada a análise da rugosidade das faces laterais do OS, que seria um parâmetro de análise interessante, visto que poderia indicar a correlação entre o material e o efeito provocado pela operação de fresagem lateral. Tendo em conta este condicionalismo, apenas foi possível avaliar a base da espiral do OS, que se encontra diretamente relacionada com a operação de fresagem de topo.

Tal como havia sido referido no Capítulo 3, os OS são produzidos recorrendo a operações de fresagem, tornando-se indispensável a análise da superfície do componente segundo as direções **radial** e **transversal**, como está representado na Figura 4.2, com o intuito de relacionar os efeitos do movimento da ferramenta de corte.

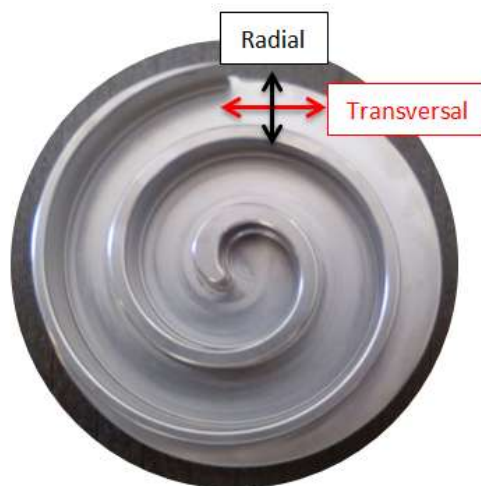


Figura 4.2: Representação das direções radial e transversal.

Para o caso da direção **radial** foram seleccionados cinco pontos igualmente espaçados (cerca de $22,5^\circ$), tal como representado na Figura 4.3, de modo a obter uma amostragem suficiente. Em cada uma das localizações registaram-se cinco medições, para garantir uma amostragem adequada.



Figura 4.3: Representação dos vários pontos onde foram realizados os ensaios.

Relativamente aos ensaios realizados segundo a direção **transversal**, devido à geometria das peças a ensaiar e à impossibilidade de recorrer a um sistema de fixação adequado, não foi possível a recolha de dados em diversos pontos, tal como seria desejado. Desta forma, apenas foi possível a análise transversal no **ponto 1**, onde foram efetuadas as mesmas cinco medições.

4.2 Ensaio Macroductura

Tendo em conta que não foi possível obter informação referente aos materiais em análise, apenas informações genéricas presentes nos *datasheet* [16][18] consultados, optou-se pela avaliação da macroductura dos materiais no seu **Estado Maquinado**, tendo sido ensaiado um exemplar de cada material. Outro dos objetivos deste ensaio prende-se com a avaliação da ductura tendo em conta a ação dos processos de forjamento e maquinagem.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, utilizando-se o aparelho *Brevetti Affri 206 RT*, com a montagem experimental representada na Figura 4.4.



Figura 4.4: Montagem experimental do ensaio de macroductura (Topo do OS).

Atendendo aos valores de dureza consultados nas *datasheet* [16][18], que serviriam de referência, optou-se por utilizar a escala de dureza *Rockwell B* (HRB). Os ensaios foram então realizados de acordo com norma ASTM E18/ISO 6508-1, que rege os ensaios de dureza, impondo-se a utilização de um indentador esférico, com um diâmetro de 1/16", e a aplicação de uma carga principal de 100 *kgf*, consistindo o procedimento experimental nas seguintes etapas:

- 1- Aplicação de uma pré-carga de 10 *kgf* (F_0);
- 2- Aplicação da carga principal por um período de 15s (F_1);
- 3- Leitura do valor da dureza.

Apresenta-se na Figura 4.5, o modo de obtenção do valor de dureza, sendo este determinado pela diferença entre o valor de referência para a escala *Rockwell B* (HRB), ou seja, 130, e a diferença entre as penetrações inicial e final (grandeza representada por e).

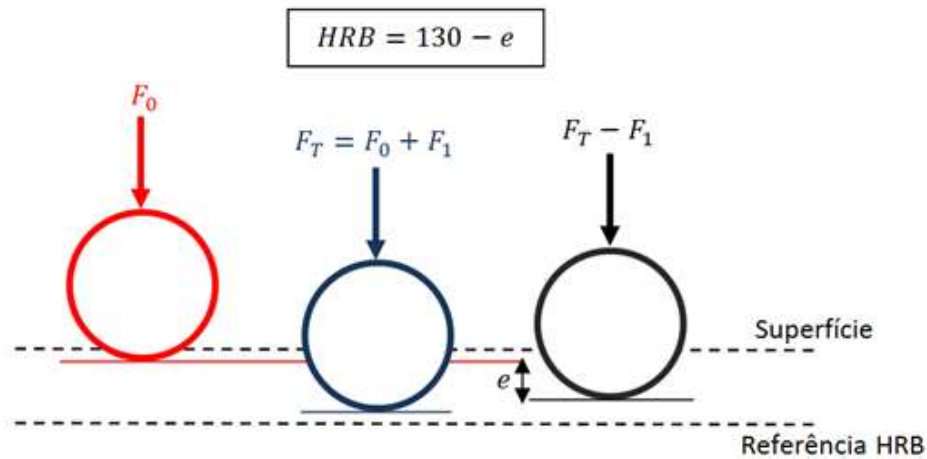


Figura 4.5: Representação da determinação do valor de dureza.

Destaca-se ainda que neste ensaio foram avaliados os valores de dureza para a **Base**, **Topo** e **Lateral** do OS, tal como se encontra representado na Figura 4.6, recorrendo ao mesmo procedimento experimental e técnica de análise para os dois materiais.

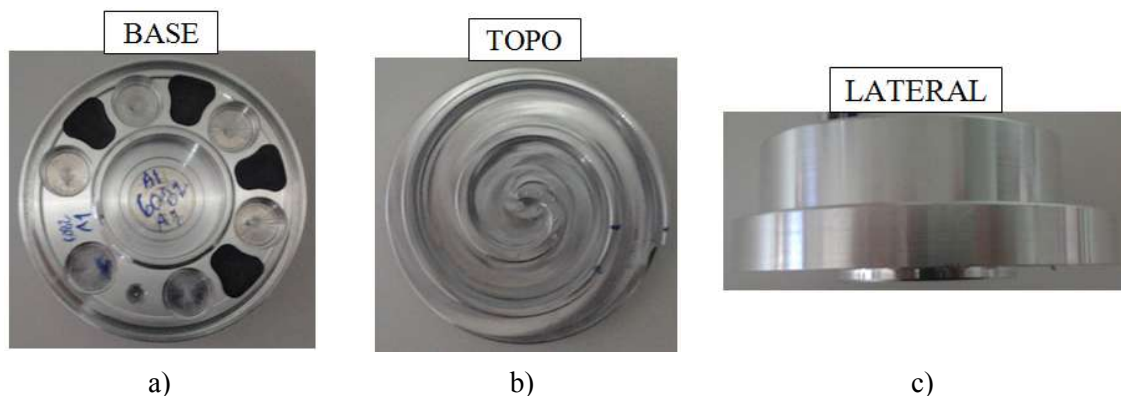


Figura 4.6: Representação do OS: a) Base, b) Topo, c) Lateral.

4.3 Choque Térmico

Para melhor se avaliar a adesão efetiva do revestimento de Níquel, bem como o estado do próprio substrato, realiza-se o ensaio de Choque Térmico, tendo sido analisados os OS em **Estado Final**. Este ensaio consiste no aquecimento seguido de rápido arrefecimento do componente, num processo semelhante ao de têmpera, originando a recristalização do substrato e o seu envelhecimento (implicando a diminuição do valor de dureza). Estas transformações metalúrgicas, que resultam no coalescimento de grão e rearranjo cristalográfico, podem originar alterações que se reflitam na superfície do substrato e consequentemente na interface Al/Ni-P, levando ao aparecimento de defeitos como o aparecimento de bolhas (ilustrado na Figura 4.7).

Trata-se de um ensaio qualitativo em que a análise dos componentes é feita somente através de inspeção visual, classificando-se os componentes como Conformes ou Não-Conformes.



Figura 4.7: Exemplo de peça onde se verificou aparecimento de bolhas.

Os ensaios de Choque Térmico foram realizados no Laboratório de Química da HVCC, tendo obedecido ao procedimento experimental definido pela empresa, destacando-se o facto de estes ensaios se incluírem nos testes usualmente realizados na HVCC para controlo de qualidade e melhoria de processo. Apresenta-se então o procedimento experimental:

- 1- Aquecimento dos componentes a ensaiar numa Mufla (tipo de estufa utilizada para altas temperaturas), a uma temperatura de 200°C, por um período de 1h;
- 2- Após a fase de aquecimento os componentes são mergulhados numa tina de água à temperatura ambiente, proporcionando o seu rápido arrefecimento;
- 3- Secagem manual dos componentes a analisar.

4.4 Teste Catódico

Tal como o ensaio de Choque Térmico, o Teste Catódico é um ensaio que tem como objetivo a avaliação do revestimento, nomeadamente verificar a existência de defeitos/descontinuidades superficiais que originem o seu descolamento, tal como se apresenta na Figura 4.8, analisando-se para tal os OS no seu **Estado Final**.



Figura 4.8: Exemplo de OS Não-Conforme que apresenta arrancamento do revestimento.

O teste é realizado segundo a configuração representada na Figura 4.9, que se trata de uma célula eletrolítica alcalina (NaOH a 5%), onde o OS é solicitado como Ânodo e se recorre a um bloco de Aço Inoxidável como Cátodo. É utilizada uma fonte de alimentação para permitir o fluxo de eletrões entre o Ânodo e o Cátodo, fazendo com que os eletrões libertados na reação de oxidação ocorrida no OS possam migrar para o bloco de Aço Inoxidável, originando a reação de redução.

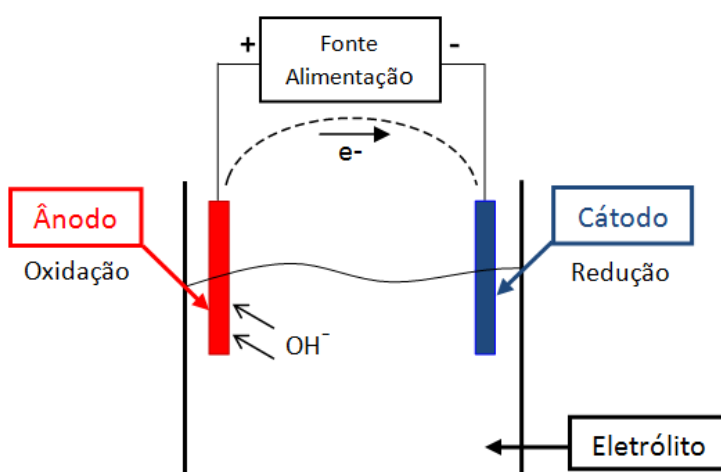
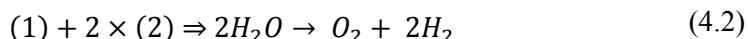
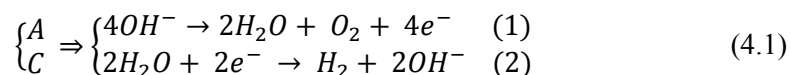


Figura 4.9: Esquema Eletroquímico do Teste Catódico. Adaptado de[24]

Apresentam-se as reações que intervêm no ensaio realizado, destacando-se as reações afetadas ao Ânodo, por se tratar do componente em análise:

- 1- Eletrólise da Água (em meio alcalino), representando cada uma das reações que ocorrem no Ânodo (A) e no Cátodo (C) (Equação 4.1 e Equação 4.2):



- 2- Reação de Oxidação do Ânodo (Equação 4.3), ocorrendo esta somente em zonas do OS onde se verifique uma falha/descontinuidade no revestimento:



Esta reação de oxidação do substrato, que se deve ao facto deste não se encontrar passivado (por ter sido submetido ao processo de *Electroless*) promove a sua corrosão. Nas zonas de descontinuidades, o substrato apresenta-se como Al^{3+} , encontrando-se assim disponível para formar hidróxidos de Alumínio ($Al(OH)_3$). Este fenómeno poderá ter como consequência o descolamento do revestimento nas proximidades da zona afetada [24].

O teste foi realizado no Laboratório de Química da HVCC, tendo sido utilizada a montagem experimental presente na Figura 4.10, e respeitado o procedimento definido pela própria empresa. Tal como havia sido referido, destaca-se que o OS é solicitado como Ânodo na célula eletrolítica. Apresentam-se ainda, na Tabela 4.5, os parâmetros de ensaio utilizados neste teste.

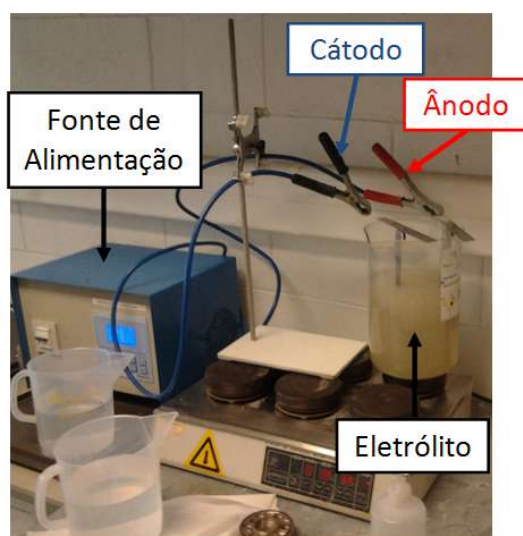


Figura 4.10: Montagem experimental do Teste Catódico.

Tabela 4.5: Parâmetros de ensaio para o Teste Catódico.

Parâmetros de Ensaio	
Temperatura do Banho	$> 70^{\circ}\text{C}$
Composição do Eletrólito	<i>NaOH</i> 5%
Densidade de Corrente	30 A/dm^2
Tempo de Exposição	5 min

Após terminado o ensaio, os componentes são lavados em água destilada, utilizando-se para tal dois recipientes, (como se apresenta na Figura 4.10), seguindo-se a sua secagem manual e posterior secagem em estufa, que é realizada durante 30 min a uma temperatura de 60°C .

4.5 Análises Metalográficas

No seguimento dos ensaios de Choque Térmico e Teste Catódico, procedeu-se à preparação de amostras metalográficas (obtidas a partir dos OS) para a avaliação de possíveis problemas de adesão do revestimento Ni-P e determinação da sua espessura, recorrendo para tal a microscopia ótica. Adicionalmente é possível a avaliação do estado do substrato, nomeadamente a averiguação de defeitos superficiais (Figura 4.11).



Figura 4.11: Exemplos de problemas de adesão do revestimento Ni-P.

A preparação das amostras teve em conta o procedimento experimental da HVCC, uma vez que toda esta etapa, bem como a análise metalográfica, foi realizada no Laboratório Metalográfico da empresa. O corte das peças foi feito tendo como objetivo a observação de determinadas superfícies, que se consideram fundamentais para aferir o estado do revestimento. Este foi realizado de acordo com a secção destacada a vermelho na Figura 4.12, de modo a analisar as superfícies relativas à Base (nº3 e 6), Topo (nº1), Paredes (nº2 e 7), *Ring Pocket* (nº4) e *Bearing Pocket* (nº5). Após o corte, procedeu-se à preparação das amostras com a sua montagem em resina e posteriores etapas de polimento.

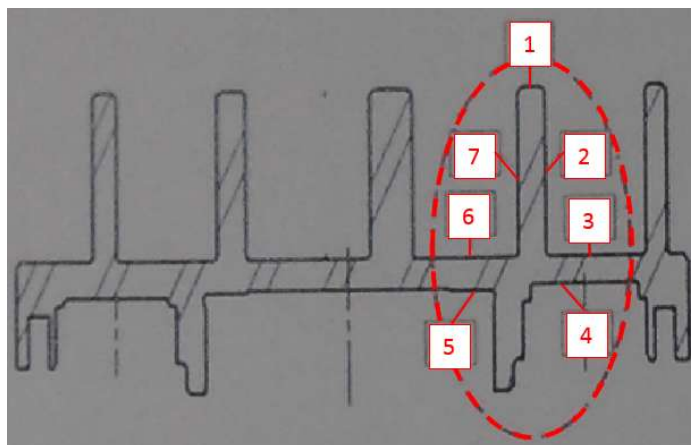


Figura 4.12: Representação em corte das zonas a observar no OS e respetiva numeração.

Uma vez concluída a preparação das amostras, que se apresentam na Figura 4.13, procedeu-se à sua análise através de microscopia ótica para a avaliação de problemas de adesão e determinação da espessura do revestimento Ni-P. Recorreu-se ao aparelho *Nikon Epiphot 200* e ao *software uEye Cockpit* para visualização das amostras, permitindo uma ampliação de 500 vezes.

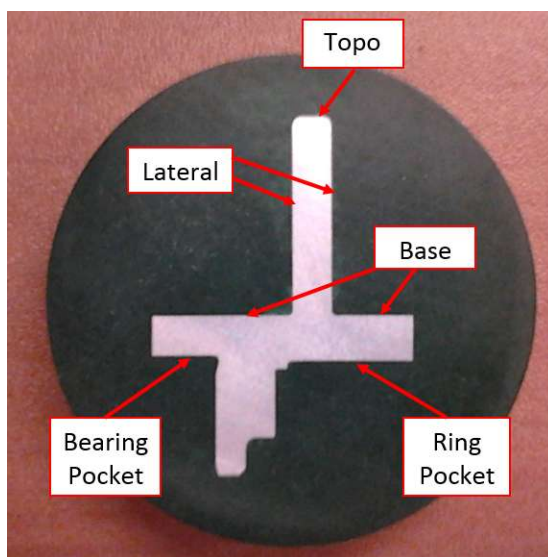


Figura 4.13: Exemplo de amostra de OS após preparação.

Foi ainda preparada uma amostra metalográfica a partir do exemplar de **FS** fabricado na liga 7075, com o objetivo de avaliar e determinar a espessura da camada anodizada (que se deverá encontrar no intervalo de $15 \pm 5 \mu m$) e ainda aferir o estado do substrato. Para tal, recorreu-se ao procedimento experimental da HVCC (em tudo semelhante ao apresentado para as amostras de OS), tendo como diferença o facto de ser necessário apenas analisar o Topo, a Base e a Lateral da amostra (como se apresenta na Figura 4.14). Após preparação da amostra foram utilizados os equipamentos e *software* descritos no parágrafo anterior.

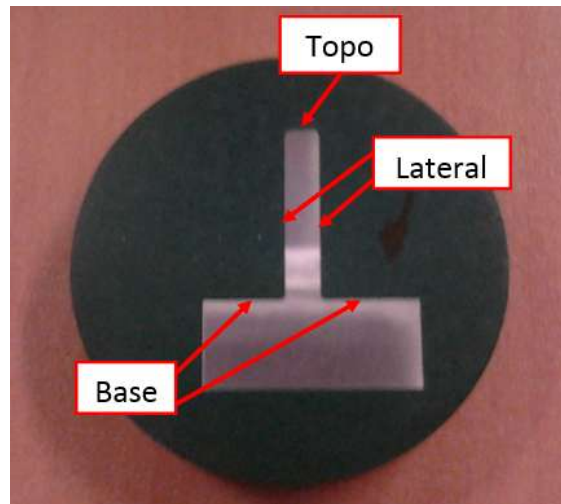


Figura 4.14: Exemplo de amostra de FS após preparação.

Destaca-se que não foi possível obter qualquer FS fabricado na liga 6082, pelo que a análise comparativa será feita com base em informação recolhida junto da empresa. Optou-se então por referenciar esta amostra como **FS 7075 AN**.

4.6 Teste de Adesão

Este teste tem como objetivo a avaliação da adesão do revestimento Ni-P, pela aplicação de cortes na superfície do componente. O teste foi realizado no Laboratório Metalográfico da HVCC, respeitando o procedimento experimental definido pela empresa, que indica que os cortes devem ser executados com uma ponteira de Aço e de forma a evidenciarem profundidade suficiente para alcançar a superfície do substrato. É assim obrigatória a execução de, no mínimo, três cortes paralelos entre si e segundo duas direções, como se apresenta na Figura 4.15.

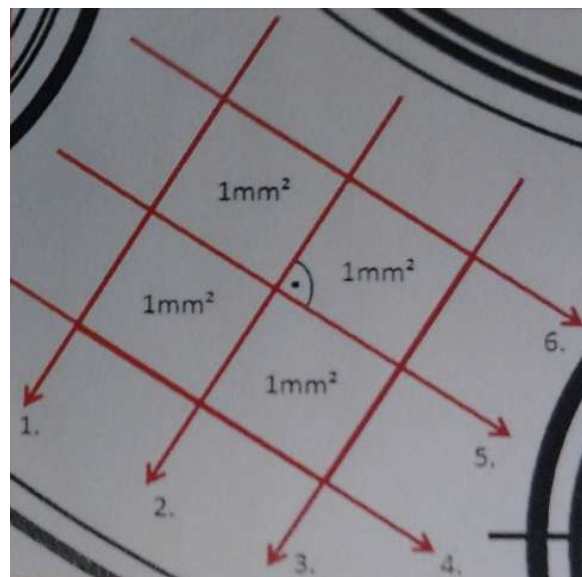


Figura 4.15: Procedimento experimental para o Teste de Adesão.

Apresenta-se, na Figura 4.16, exemplos de testes de adesão para demonstrar um peça conforme (representada à esquerda) e uma peça não-conforme (representada à direita), onde se verifica o fenómeno de descolamento do revestimento. Os resultados deste teste são qualitativos, uma vez que não é possível quantificar a força aplicada em cada risco.

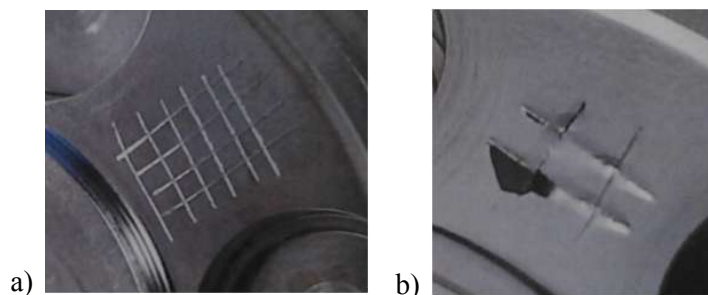


Figura 4.16: Exemplos de Testes de Adesão: a) Peça conforme, b) Peça não-conforme.

4.7 Ensaio de Desgaste

O ensaio de desgaste, realizado num tribómetro do tipo *pin-on-disc*, teve como objetivo a avaliação do revestimento, quando sujeito a uma situação de desgaste, analisando igualmente a influência do substrato no comportamento do revestimento, bem como a sua adesão. Os parâmetros de teste são então a carga aplicada e o período, tendo como resultados do ensaio a determinação do coeficiente de atrito, verificado entre o pino e o revestimento aplicado sobre a amostra, e ainda a diferença de peso verificada antes e após o ensaio. Neste ensaio foram utilizadas amostras dos dois materiais (tal como se apresenta na Figura 4.17), revestidas por *Electroless*[25].

Os testes foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, tendo-se utilizado a montagem experimental presente na Figura 4.17 e o *software Labview 2012* (programa encontra-se no Anexo A7) para análise dos dados recolhidos.

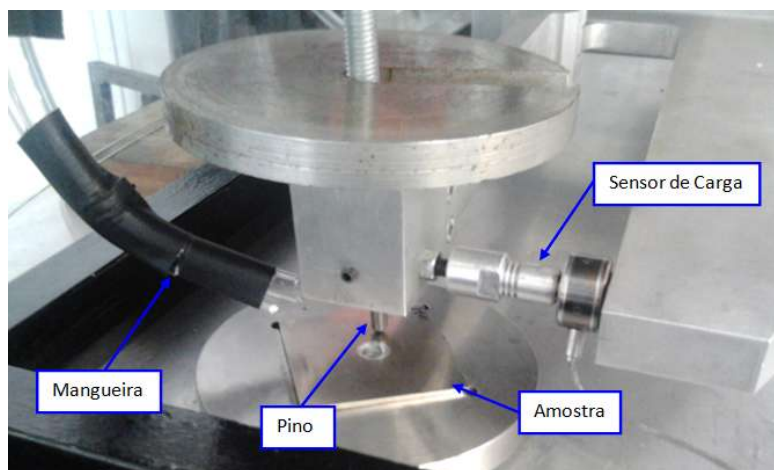


Figura 4.17: Montagem experimental do Ensaio de Desgaste.

Apresentam-se os elementos que constituem a montagem experimental:

- Sistema de aquisição de dados (*National Instruments 9237* e *National Instruments USB 9126*);
- Sensor de Carga (ELAF-10L-T1, cuja especificação técnica se encontra no Anexo A8)
- Moto-Redutor;
- Pino fabricado em Aço Rolamento;
- Pesos.

Com o objetivo de evitar a formação de óxidos superficiais, e dessa forma influenciar negativamente os resultados dos testes, bem como comprometer a integridade dos seus constituintes, foi utilizada uma atmosfera de Azoto gasoso, de modo a gerar uma atmosfera localmente inerte. Para a determinação do peso da amostra, antes e depois da realização do teste, recorreu-se a uma balança de precisão (GR-200-EC A&D *instruments* LTD).

4.8 Ensaio Ultramicrodureza

Para a determinação do valor de dureza dos revestimentos Ni-P aplicados aos OS, foi necessário recorrer ao ensaio de Ultramicrodureza, uma vez que, para a espessura definida ($10 \pm 3 \mu\text{m}$), a utilização do ensaio de microdureza implicaria que a indentação iria penetrar até ao substrato, devido ao valor das cargas aplicadas, não sendo então possível aferir o valor real de dureza do revestimento.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade de Coimbra (UC), utilizando um ultramicrodurómetro *Fischerscope H100* (apresentado na Figura 4.18) ligado a um sistema computadorizado para controlo/aquisição dos parâmetros de ensaio, como o valor de carga máxima e mínima ou a profundidade de indentação. Para a análise e tratamento dos dados, recorreu-se a um *software* (*Hardness 6.00*) desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da FCT-UC, que permite a determinação das curvas de carga e descarga, a partir das quais é possível calcular, entre outros, o valor de dureza e o módulo de *Young* [26].



Figura 4.18: Montagem Experimental do Ensaio de Ultramicrodureza.

O ensaio consiste na aplicação incremental de carga, até se atingir o valor determinado para o teste, mantendo a carga máxima durante 30s. Seguidamente, e novamente de uma forma incremental, a carga é então descarregada até a um valor mínimo, mantendo-se nesta condição por 30s. Através de regras empíricas, considera-se que a profundidade da indentação não deve ser superior a 1/7 do valor da espessura do revestimento (neste caso, para uma espessura de $10\ \mu\text{m}$, o valor máximo seria de $1,428\ \mu\text{m}$), de modo a que as características do substrato não influenciem o valor de dureza medido. Assim, aplicaram-se cargas de 1000 mN, 500 mN e 250 mN, de modo a poder compreender o efeito entre o valor da carga aplicada e a profundidade da indentação.

4.9 Ensaio *Scratch Test*

O ensaio de indentação deslizante (*Scratch Test*) tem como objetivo a avaliação do estado da adesão de filmes adicionados a um substrato, que consiste na aplicação progressiva de uma força normal (F_N) a uma amostra fixada numa mesa deslizante, sendo a indentação realizada com uma amplitude de $5\ \text{mm}$. Uma vez que o equipamento de teste denota uma taxa de aplicação da carga de $10\ \text{N/mm}$, sendo a carga inicial de $4,6\ \text{N}$, é possível definir a relação (presente na Equação 4.4) que determina o valor da carga aplicada em cada local (x) da indentação:

$$F = 10x + 4,6\ [\text{N}] \quad (4.4)$$

Apresenta-se na Figura 4.19, um esquema representativo do ensaio, onde é possível verificar o efeito do aumento da carga aplicada ao longo da indentação.

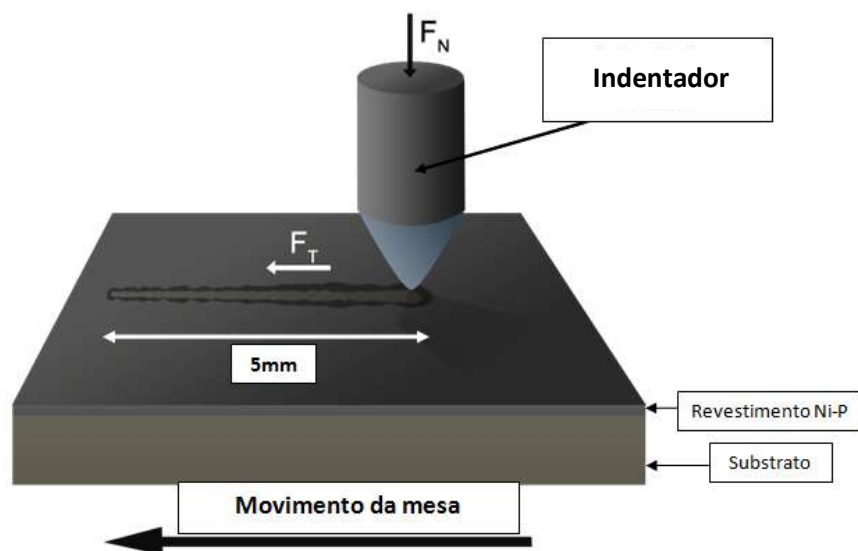


Figura 4.19: Esquema do ensaio Scratch Test. Adaptado de [27].

Após realização das indentações deslizantes é necessário a sua observação em microscópio, de forma a poder analisar possíveis alterações, nomeadamente no comportamento do revestimento e da sua adesão ao substrato [27].

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Mecânica da FCT-UC, tendo sido utilizado o equipamento CSEM-Revestest (apresentado na Figura 4.20) que recorre a um indentador de geometria *Vickers* para execução das indentações.

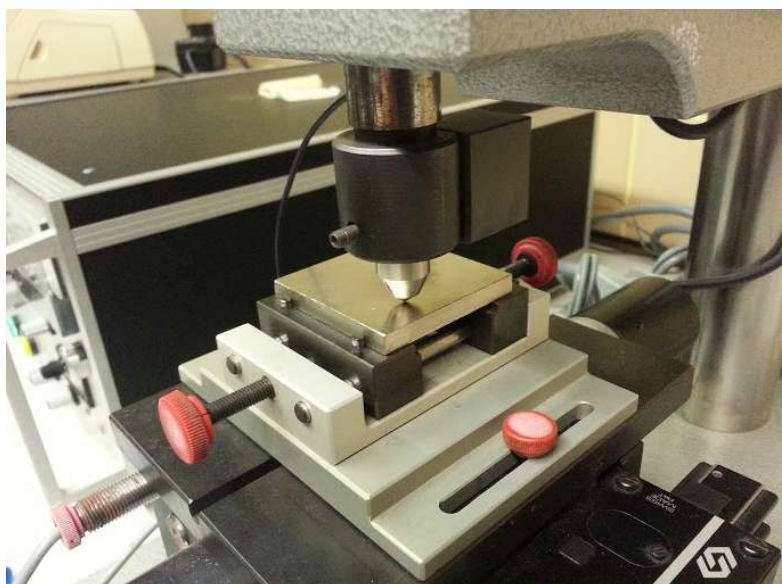


Figura 4.20: Montagem Experimental do Ensaio *Scratch Test*.

5 Resultados e Discussão

Apresentam-se neste Capítulo os resultados dos ensaios realizados bem como a sua discussão, sempre que seja pertinente.

5.1 Ensaio Rugosidade

Tal como referido no Subcapítulo 4.1, os ensaios de rugosidade foram realizados nos OS, tanto na sua forma **Estado Maquinado** como no seu **Estado Final**. Apresentam-se então os resultados destes ensaios.

Na forma **Estado Maquinado**, tendo em conta que não se procedeu à alteração de qualquer parâmetro de corte para o fabrico dos OS da liga 7075, seria expectável que este apresentasse um menor valor de rugosidade superficial. Esta expectativa tem que ver com o facto de a liga 7075 apresentar maior resistência mecânica e maior dureza, quando comparada com a liga 6082, e os referidos parâmetros influenciarem positivamente a *performance* das operações de maquinagem, conduzindo geralmente a menores valores de rugosidade superficial (após serem alvo deste tipo de operações).

Apresentam-se assim os resultados obtidos para a **direção radial**, sob a forma de gráfico (Figura 5.1), ilustrando assim as diferenças verificadas em cada ponto e entre os dois materiais em estudo. Os resultados apresentados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A4.

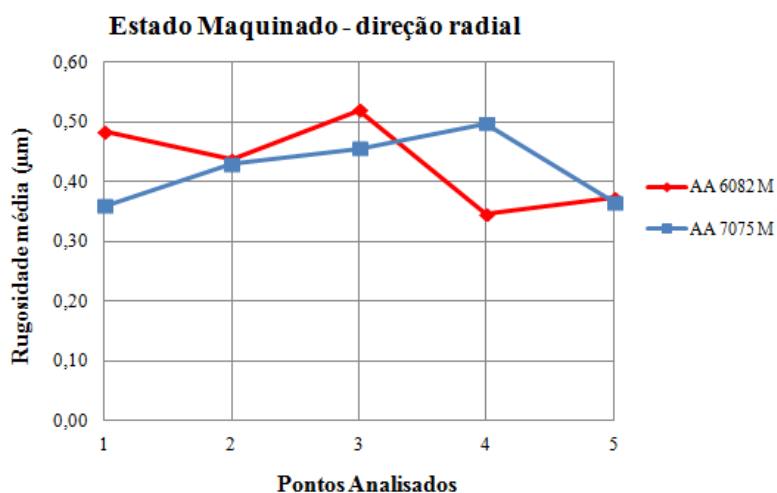


Figura 5.1: Gráfico referente ao Ensaio de Rugosidade no Estado Maquinado, para a direção radial.

Os resultados demonstram então que o OS fabricado na liga 7075 apresentou um menor valor de rugosidade superficial (R_A), à exceção do **ponto 4** (onde a diferença apresentada entre os dois materiais não é contudo significativa), resultado esperado atendendo às características do próprio material. Conclui-se que os dois materiais apresentam resultados dentro da gama de valores especificados pela HVCC, ou seja $R_A < 0,6 \mu m$.

Para a **direção transversal** importa referir que só foi possível a realização de medições numa só localização (como mencionado no Subcapítulo 4.1), apresentando-se assim na Tabela 5.1 os valores de rugosidade obtidos para o **ponto 1**. Os resultados aqui destacados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A4.

Tabela 5.1: Valores de Rugosidade no Estado Maquinado, na direção transversal.

Medição	Rugosidade Média (μm)	
	AA 6082 M	AA 7075 M
1	0,26	0,22
2	0,25	0,22
3	0,26	0,22
4	0,27	0,21
5	0,26	0,21
Média	0,26	0,22

Verifica-se então que, para direção transversal, a liga 7075 apresenta valores mais baixos de rugosidade, em comparação com a liga 6082, validando assim os resultados alcançados na direção radial.

Conclui-se assim que, para o **Estado Maquinado**, a liga 7075 apresenta menores valores de rugosidade superficial, nas duas direções testadas, mesmo sem alteração dos parâmetros de corte. É possível verificar ainda o efeito do movimento da ferramenta de corte nos valores de rugosidade superficial recolhidos, uma vez que estes apresentam diferenças relativamente à direção analisada.

Na avaliação da rugosidade superficial foram igualmente analisadas peças no seu **Estado Final**, ou seja, após aplicação do processo Niquelagem. Nesta etapa do processo produtivo não seria possível apresentar uma projeção dos resultados dos testes, uma vez que os títulos dos banhos se encontram afinados para a liga atualmente utilizada, tendo especialmente em conta a influência dos diferentes elementos de liga.

Apresentam-se na Figura 5.2 os resultados obtidos para a **direção radial**, destacando o facto de que foram analisados dois OS fabricados na liga 7075, referenciados como **AA 7075 N1** e **AA 7075 N2**, respetivamente. Os resultados apresentados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram presentes no Anexo A5.

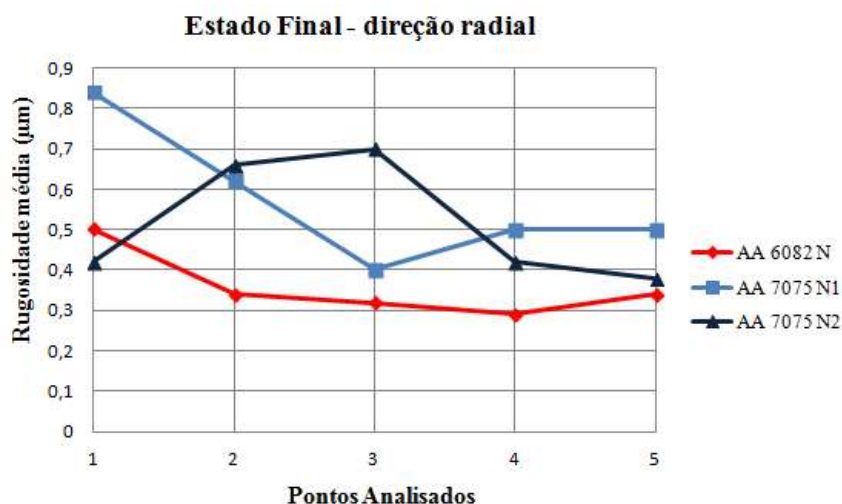


Figura 5.2: Gráfico referente ao Ensaio de Rugosidade no Estado Final, para a direção radial.

Ao analisar os resultados verifica-se que a liga 6082 apresenta não só menores valores de rugosidade superficial como estes denotam menor variabilidade nos diferentes pontos analisados. Por sua vez, os resultados apresentados pela liga 7075 denotam uma grande variabilidade entre os pontos analisados, tendo como possível explicação o facto de os banhos utilizados no processo de Niquelagem se encontrarem otimizados para a liga 6082. Esta situação irá influenciar negativamente o resultado de todas as operações de *Smut*, *Desmut* e Zincagem, conduzindo a valores de rugosidades superiores e a diferenças significativas entre amostras (em desfavor da liga 7075).

É importante referir que, no caso do processo de Zincagem, o facto da liga 7075 apresentar como principal elemento de liga o Zinco, poderá implicar efeitos negativos nesta etapa do processo. Este facto poderá significar a deposição de partículas de Zinco num substrato onde já existam precipitados deste elemento, o que poderá conduzir em dificuldades na remoção da camada de Zinco e no surgimento de posteriores irregularidades no revestimento Ni-P.

São apresentados na Tabela 5.2 os resultados obtidos nos ensaios referentes à **direção transversal**. Os resultados que se apresentam tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A5.

Tabela 5.2: Valores de Rugosidade no estado Final, na direção transversal.

Medição	Rugosidade Média (µm)		
	AA 6082 N	AA 7075 N1	AA 7075 N2
1	0,24	0,37	0,40
2	0,23	0,36	0,39
3	0,22	0,37	0,41
4	0,25	0,36	0,41
5	0,25	0,36	0,41
Média	0,24	0,36	0,40

Tal como para a direção radial, a liga 6082 apresenta menores valores de rugosidade na direção transversal, sendo estes semelhantes aos verificados para o Estado Maquinado, podendo-se assim concluir que a aplicação de um revestimento Ni-P não contribui para a alteração do valor da rugosidade superficial na direção analisada. Relativamente aos resultados apresentados pela liga 7075, estes apresentam não só menores valores de rugosidade bem como menor variabilidade (quando comparados com a direção radial).

Conclui-se que, apesar de não ter sido possível a produção em número significativo de OS na liga 7075, é razoável prever que a utilização deste material poderia revelar-se um fator importante na mitigação dos problemas presentes no processo produtivo, nomeadamente os relacionados com o desgaste precoce das ferramentas de corte e a eliminação do fenómeno de “microssoldaduras”. Por outro lado, e no que diz respeito aos resultados para o **Estado Final**, a alteração nos constituintes dos banhos do processo de *Electroless* poderia conduzir a resultados mais próximos dos atualmente verificados pela liga 6082. Tal como referido, os constituintes dos banhos não se encontram otimizados para os elementos de liga do novo material, e a sua análise e estudo poderia conduzir em melhorias no processo e, consequentemente, melhores resultados para o revestimento Ni-P aplicado na liga 7075. Ainda assim, e apesar das diferenças encontradas, os resultados podem ser considerados aceitáveis, uma vez que cumprem todos os requisitos ao nível das especificações.

5.2 Ensaio Macro dureza

O ensaio de Macro dureza tem como principal objetivo a validação dos valores teóricos de dureza associados a estes materiais, bem como aferir se as etapas de forjamento e maquinagem provocam algum tipo de alteração nesta propriedade dos materiais. Apresentam-se então os resultados deste ensaio, realizado na **Base**, **Topo** e **Lateral**, e tendo em atenção que foi utilizada a escala *Rockwell B*.

Apresentam-se na Figura 5.3 os valores de dureza obtidos para a **Base** do OS, onde se demonstra tanto a gama como a variação dos valores obtidos. Os resultados apresentados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A6.

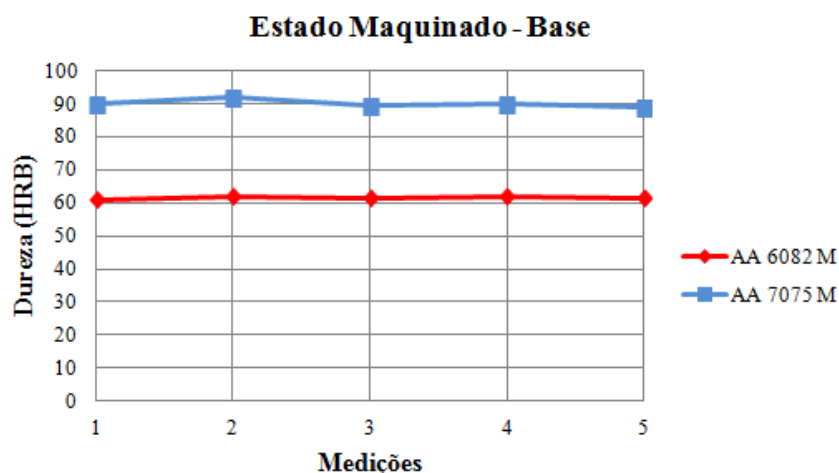


Figura 5.3: Gráfico referente ao Ensaio de Macroductura realizado na Base do OS.

Como se verifica pela análise dos resultados, não se regista uma variação significativa nos valores de dureza obtidos para a Base do OS, contudo torna-se evidente a diferença verificada entre os materiais.

Relativamente aos ensaios realizados no **Topo**, apresentam-se na Figura 5.4 os valores de dureza obtidos, onde se demonstra a gama e variação dos valores obtidos. Os resultados apresentados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A6.

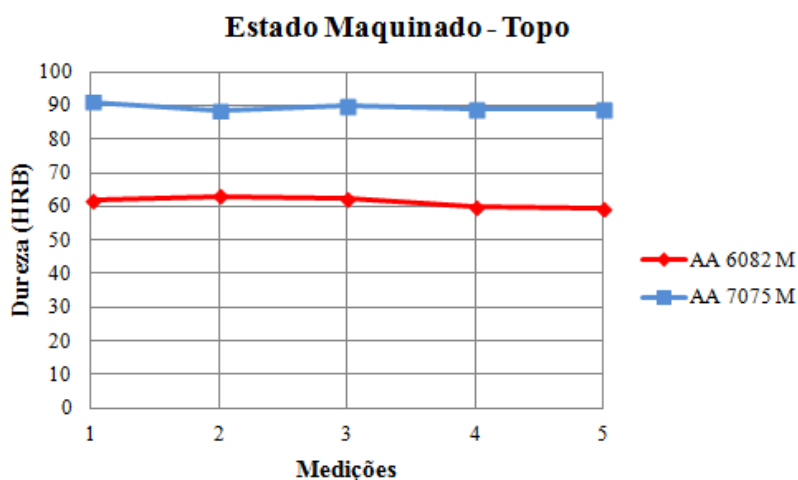


Figura 5.4: Gráfico referente ao Ensaio de Macroductura realizado no Topo do OS.

Através da análise dos resultados para o Topo, facilmente se replicam as conclusões verificadas para a Base, acrescentando-se a similaridade verificada entre os valores ensaiados. Este facto confirma a dissociação entre o efeito das operações de maquinagem e forjamento e a variação dos valores de dureza dos componentes.

Optou-se ainda por analisar a dureza do material na superfície **Lateral** do OS, com o intuito de verificar a relação entre uma superfície sujeita a um diferente tipo de operação de maquinagem (no caso fresagem lateral, ao passo que as superfícies de Topo e Base são alvo de

fresagem de topo) e a possível alteração do valor de dureza. Apresentam-se assim, na Figura 5.5, os resultados dos ensaios de dureza realizados na superfície Lateral do OS. Os resultados apresentados tratam-se de médias dos valores ensaiados, que se encontram no Anexo A6.

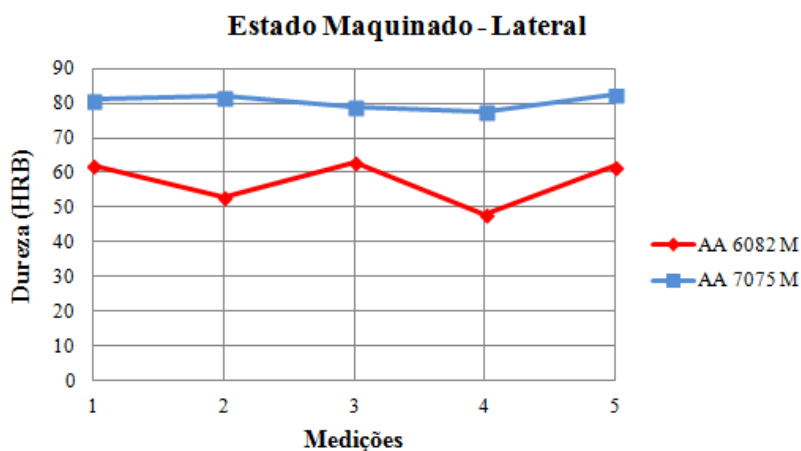


Figura 5.5: Gráfico referente ao Ensaio de Macro dureza realizado na Lateral do OS.

Pela análise do gráfico é possível verificar que os resultados não são coerentes com os valores verificados nas restantes localizações, denotando não só menores valores de dureza, bem como uma certa variabilidade nas medições efetuadas. Esta diferença de resultados pode ser explicada pelo facto de, para este ensaio e nomeadamente para a geometria do indentador, ser necessário garantir a perpendicularidade entre o eixo do indentador e a superfície do material a analisar. Representa-se, na Figura 5.6, a condição de perpendicularidade necessária para a correta determinação do valor de dureza do material, e uma vez que a superfície lateral não respeita a condição, os resultados não podem ser tidos em conta.

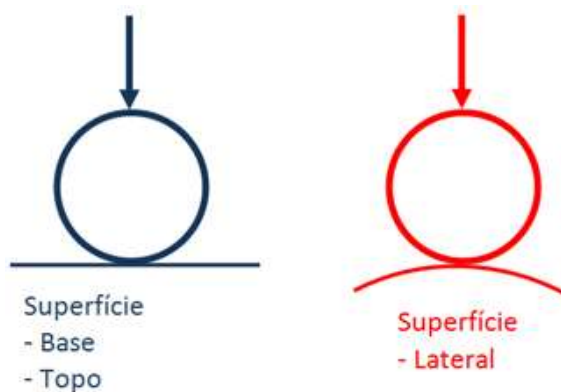


Figura 5.6: Representação da condição necessária para o ensaio de Macro dureza.

Com a realização dos ensaios de Macro dureza é possível concluir que os materiais testados demonstram valores de dureza de acordo com o especificado nas *datasheets* consultadas, não exibindo grande variabilidade entre as superfícies avaliadas. Conclui-se que o OS produzido na liga 7075 possui uma dureza na ordem dos 90 HRB, o que se traduz num aumento significativo desta característica, quando comparado com a liga 6082, e que suporta a

ideia de contribuir diretamente para a eliminação dos problemas relacionados com as etapas de maquinagem.

5.3 Choque Térmico

Os ensaios foram realizados em OS no **Estado Final**, tendo como objetivo a avaliação do revestimento Ni-P aplicado no substrato de Alumínio. Tal como foi referido no Subcapítulo 4.3, uma vez que se trata de um ensaio qualitativo, os resultados traduzem-se apenas na classificação dos componentes como conforme ou não-conforme, devendo a sua avaliação à inspeção visual realizada às peças ensaiadas. Os componentes testados foram então os OS com as seguintes referências: **AA6082N**, **AA7075N1** e **AA7075N2**.

Os resultados obtidos neste ensaio demonstraram que todos os OS analisados estariam conformes, ou seja, não apresentaram nenhum tipo de alterações (como por exemplo o aparecimento de bolhas ou defeitos superficiais). Com estes resultados é possível inferir o estado da interface, uma vez que, ao não ter sido verificada nenhuma alteração no revestimento, traduz o estado desta superfície. Refere-se no entanto o facto de não ser usual encontrarem-se falhas nos componentes que são alvo deste teste (por informação fornecida pela HVCC).

5.4 Teste Catódico

Antes de proceder à análise e discussão dos resultados deste teste, torna-se importante referir que os componentes testados foram os mesmos do ensaio de Choque Térmico (**AA6082N**, **AA7075N1** e **AA7075N2**). Esta nota revela-se pertinente, pois de acordo com o procedimento experimental da HVCC, cada teste deveria ser executado em amostras diferentes. Ainda assim, e atendendo às limitações relativas ao número de peças cedidas para a realização do presente estudo, considera-se este teste como válido uma vez que os resultados do teste anteriormente referido (Subcapítulo 5.3) davam conta do estado de conformidade das peças.

Ao analisar os resultados dos testes verifica-se que, em todas as amostras, não se detetaram falhas significativas no revestimento de Ni-P, à exceção dos pontos assinalados na Figura 5.7.

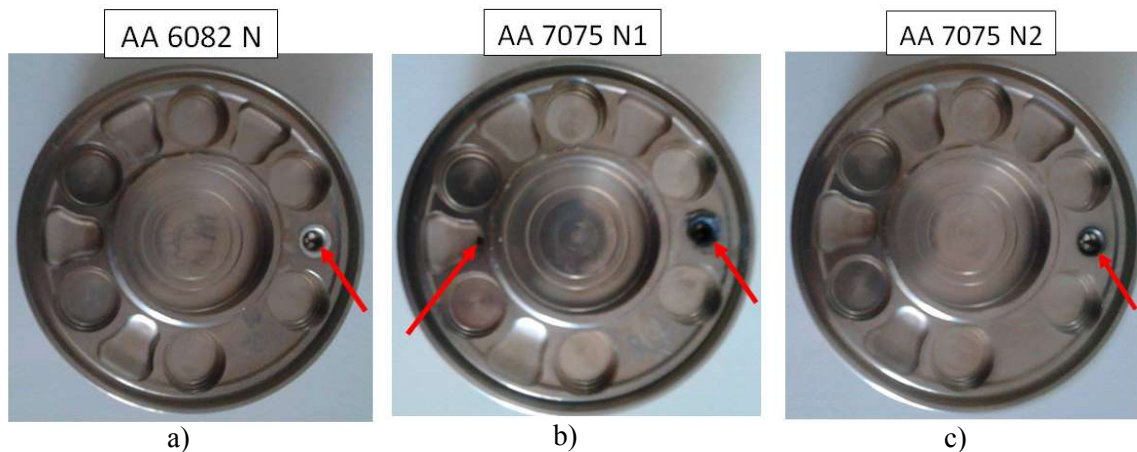


Figura 5.7: Resultados do Teste Catódico: a) AA 6082 N, b) AA 7075 N1, c) AA 7075 N2

Elabora-se então uma análise detalhada relativa aos pontos indicados na Figura 5.7:

- 1- **Furo Roscado:** é utilizado para fixação do OS em *rack* durante o processo de Niquelagem. Não se encontra então abrangido pelo revestimento, deixando o substrato exposto ao eletrólito, originando reações de oxidação que culminam na corrosão localizada do Alumínio;
- 2- **AA 7075 N1:** verificou-se o aparecimento de um ponto onde, por falta de adesão do revestimento, se deu a reação enunciada no Subcapítulo 4.4. Esta situação pode ser explicada pelo facto de se tratar uma zona do OS que permanece no seu estado *As-Machined* (ou seja, não é alvo de qualquer operação de maquinagem, tal como se verifica na Figura 4.6). Esta situação conduz a dificuldades na adesão do revestimento, justificando assim a corrosão verificada nesse mesmo local. Uma vez que este se encontra numa superfície não-funcional do OS, o componente é considerado conforme, tratando-se de uma situação frequente para outras amostras.

Ao se verificar que todos os OS ensaiados reúnem as condições necessárias para serem considerados conformes, reforça-se a qualidade do revestimento, nomeadamente a sua adesão, uma vez que não foram detetadas falhas em áreas funcionais do componente. É possível então aferir a qualidade da adesão do revestimento para a liga 7075, o que já havia sido destacado pelos artigos apresentados na Tabela 3.2.

5.5 Análises Metalográficas

Através da preparação de amostras metalográficas, e recorrendo a microscopia ótica, foi possível a avaliação tanto do estado do revestimento como do próprio substrato, aferir eventuais problemas de adesão e ainda a determinação da espessura do próprio revestimento.

Refere-se que não foi possível respeitar inteiramente o procedimento experimental apresentado no Subcapítulo 4.5, optando-se pela aquisição de imagens somente nos locais onde usualmente se verificam não-conformidades (que se tratam do Topo, Base e Lateral). Apresentam-se assim os valores de espessura do revestimento Ni-P (para as amostras obtidas de OS) e os valores de espessura da camada anodizada (para a amostra de FS), respetivamente para os locais referidos, tendo em atenção que foi realizada uma análise a todo o perímetro da amostra.

5.5.1 AA 6082 N

Apresentam-se seguidamente os resultados (presentes na Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10) da análise realizada às amostras retiradas do OS fabricado na liga 6082, representando respetivamente o Topo, Base e Lateral.

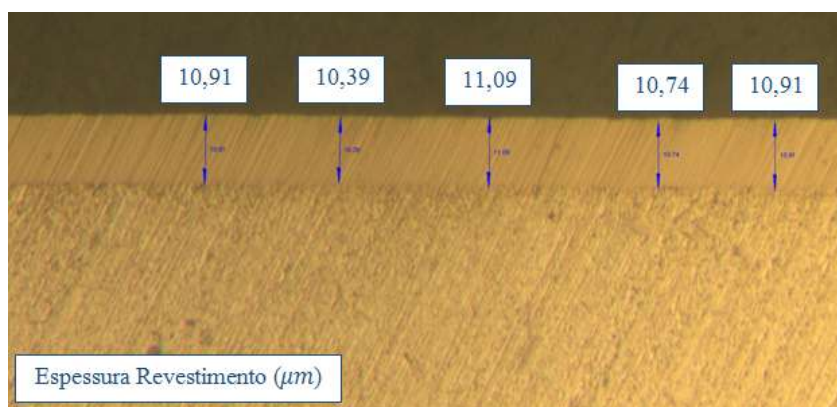


Figura 5.8: Topo AA 6082 N.

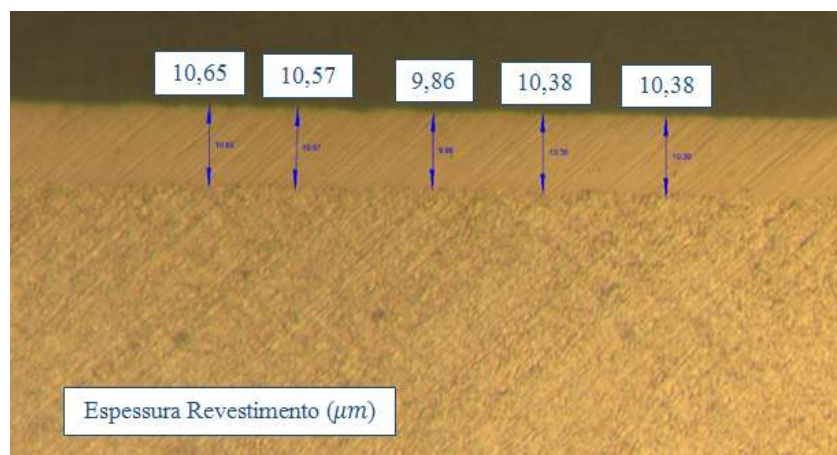


Figura 5.9: Base AA 6082 N.

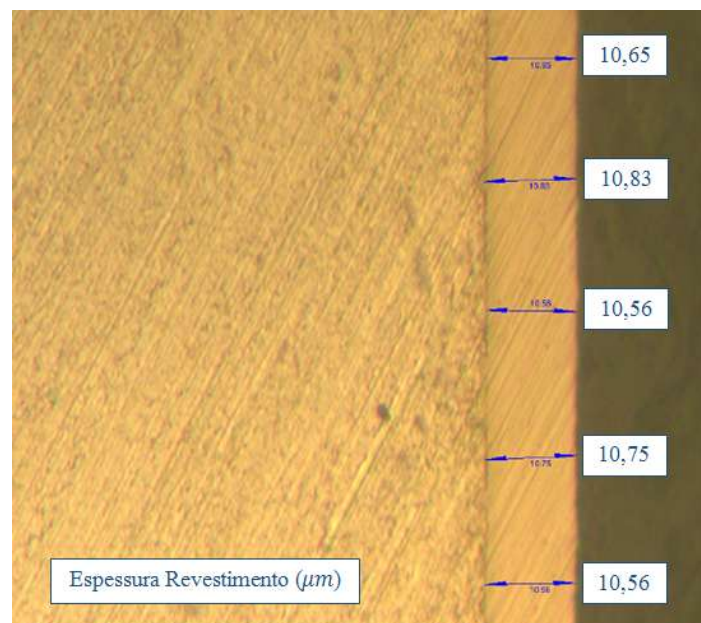


Figura 5.10: Lateral AA 6082 N.

Verifica-se que o revestimento não apresenta qualquer tipo de problema de adesão e que a sua espessura se encontra dentro de especificação ($10 \pm 3 \mu\text{m}$), pela análise realizada ao longo de toda a amostra.

5.5.2 AA 7075 N1

Tal como para o caso anterior, são apresentados os resultados (destacados na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13) relativos à primeira amostra de OS produzida na liga 7075, representando respetivamente o Topo, Base e Lateral.

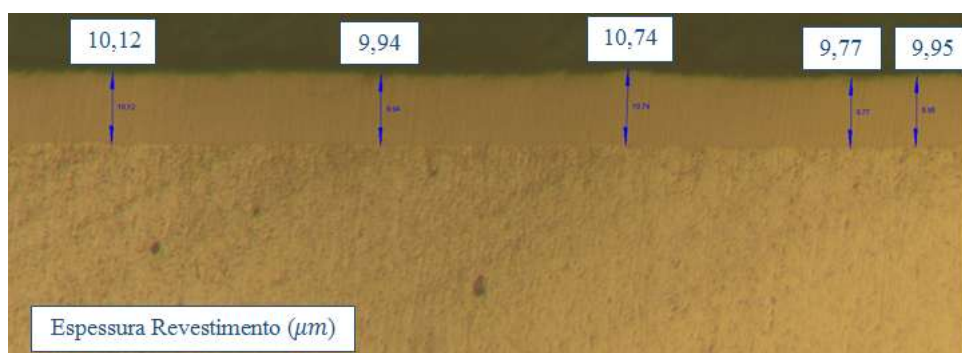


Figura 5.11: Topo AA 7075 N1.

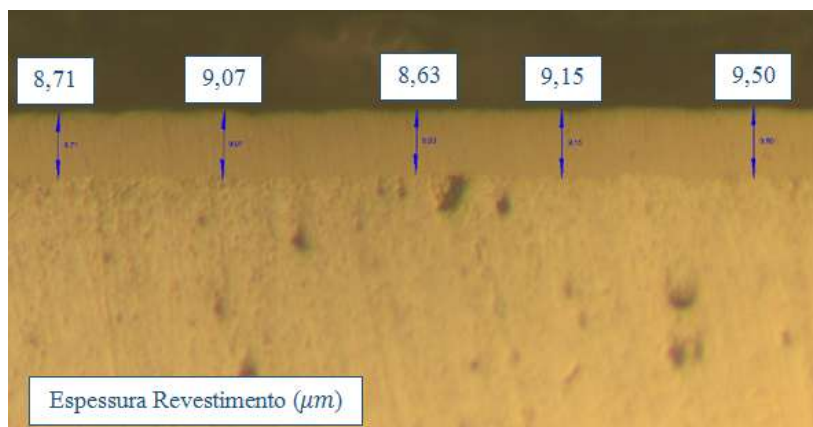


Figura 5.12: Base AA 7075 N1.

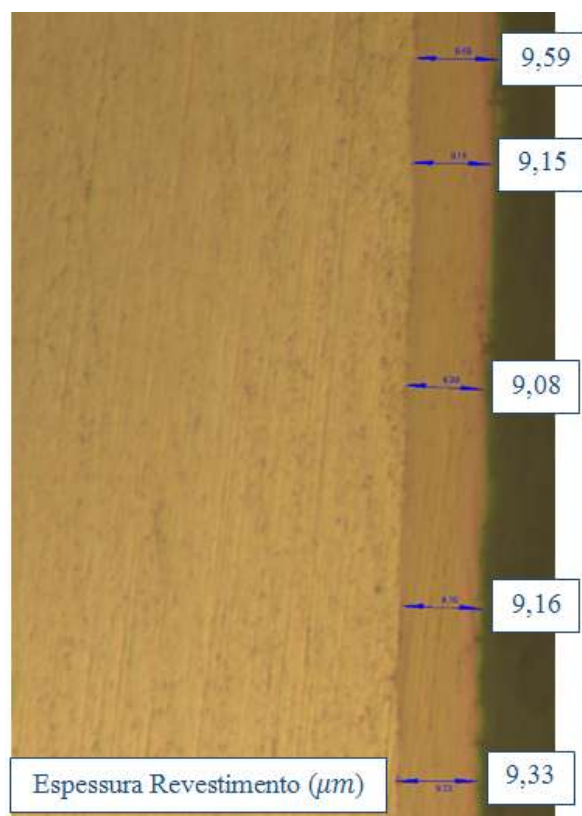


Figura 5.13: Lateral AA 7075 N1.

Pela análise dos resultados conclui-se que o revestimento não apresenta qualquer tipo de problema de adesão, encontrando-se os valores de espessura conforme a especificação.

5.5.3 AA 7075 N2

Apresentam-se os resultados da segunda amostra produzida na liga 7075, representados na Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16.

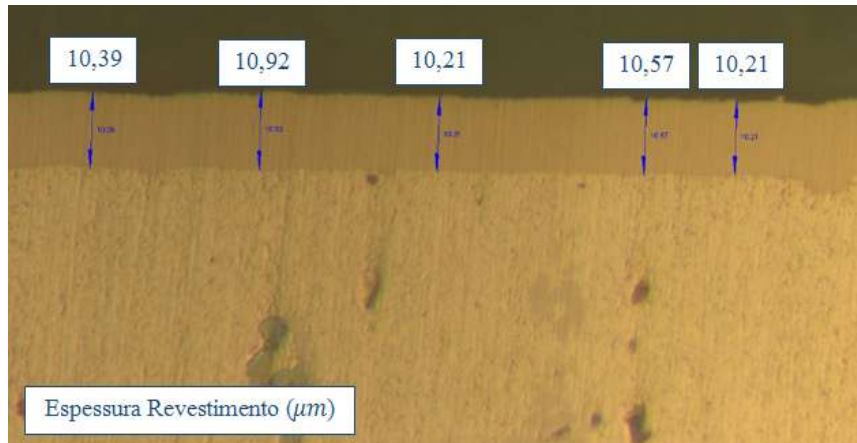


Figura 5.14: Topo AA 7075 N2.

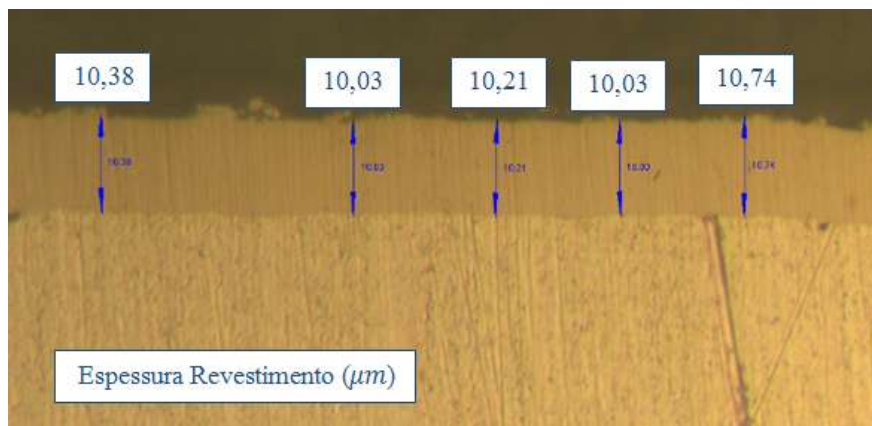


Figura 5.15: Base AA 7075 N2.

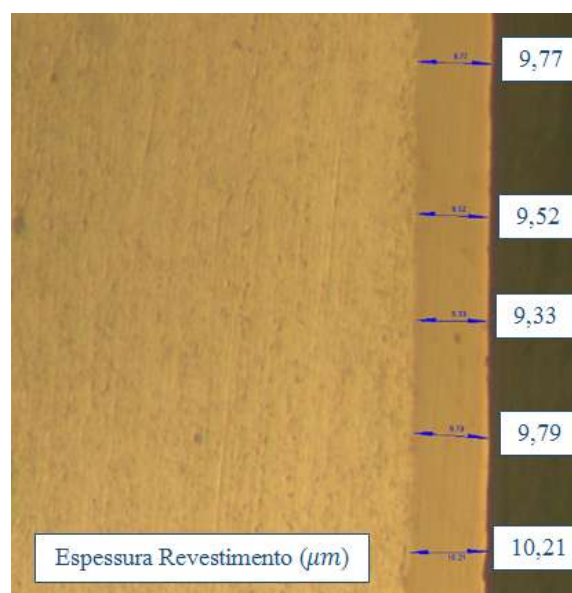


Figura 5.16: Lateral AA 7075 N2.

Tal como para as restantes amostras, não se verificou nenhuma não-conformidade, dando conta da boa adesão e espessura uniforme do revestimento.

Através da análise dos resultados obtidos para as amostras AA 6082 N, AA 7075 N1 e AA 7075 N2, conclui-se que o revestimento Ni-P apresenta valores de espessura muito semelhantes entre amostras, sempre de acordo com a especificação. Verificou-se também, através da análise feita ao longo do perímetro de toda a amostra, a ausência de não-conformidades na interface Al/Ni-P, apontando assim para o sucesso obtido no processo de Niquelagem.

5.5.4 FS 7075 AN

Com o objetivo de analisar o estado da camada anodizada, nomeadamente o valor da espessura e ainda o comportamento da liga 7075 perante o processo de Anodização, foi preparada uma amostra do FS fabricado na liga 7075. Apresentam-se então os resultados, ilustrados pela Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19.

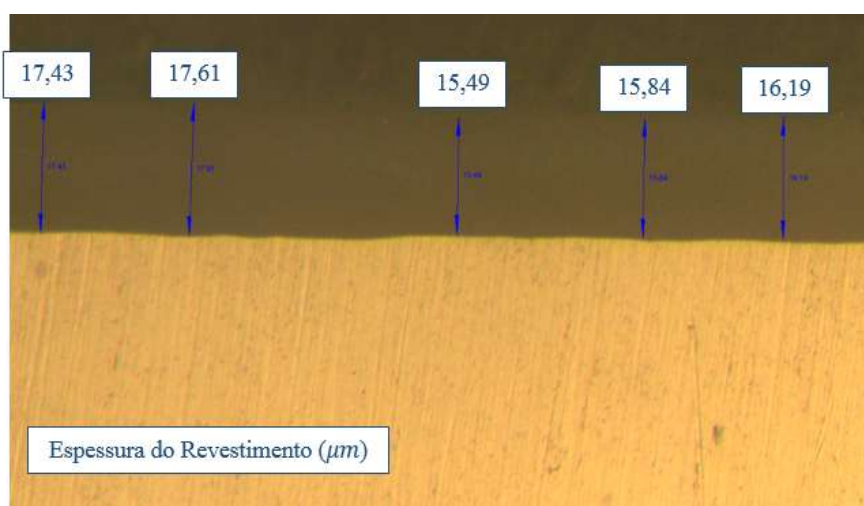


Figura 5.17: Topo FS 7075 AN.

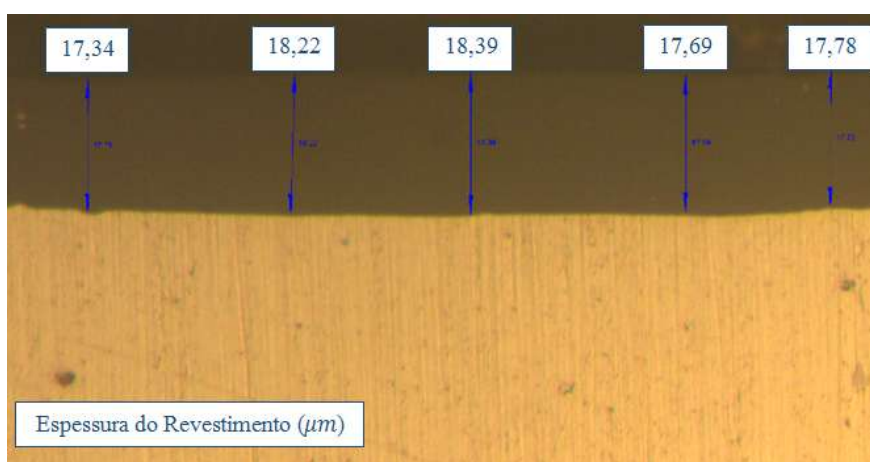


Figura 5.18: Base FS 7075 AN.

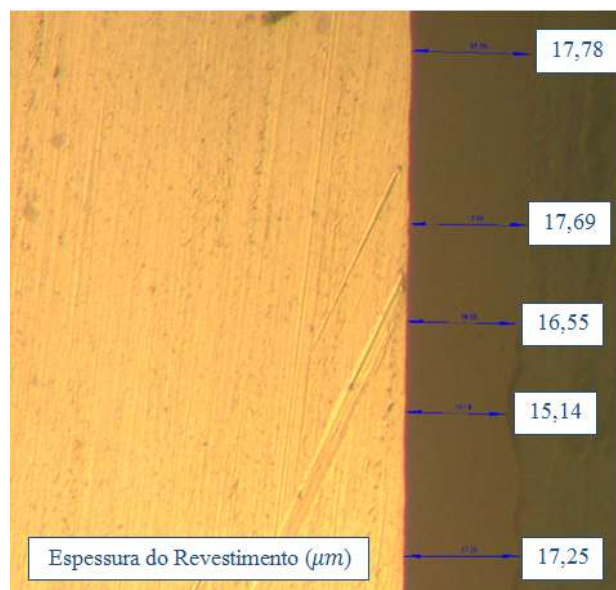


Figura 5.19: Lateral FS 7075 AN.

Conclui-se então que a camada anodizada respeita os valores de espessura especificados ($15 \pm 5 \mu m$), não se tendo verificando qualquer defeito ou não-conformidade na análise feita ao longo do perímetro da amostra. Relativamente ao substrato, este não evidenciou qualquer falha, inclusivamente na interface entre o substrato e a camada anodizada. Apesar de não ter sido possível a realização de testes em FS fabricados na liga 6082, os resultados acima apresentados revelam-se em tudo semelhantes (tendo em conta informação obtida junto da HVCC), indicando assim a boa prestação da liga 7075 após anodização.

5.6 Teste Adesão

É importante referir que, para o Teste de Adesão, os riscos foram realizados manualmente, tal como refere o procedimento experimental, e com o auxílio de uma ponteira de Aço, implicando assim a impossibilidade de determinação da força aplicada. Contudo, e uma vez que os riscos aplicados apresentaram uma profundidade suficiente para atingir o substrato, é possível a classificação das amostras, tendo em conta o comportamento demonstrado pelo revestimento.

Apresentam-se assim, na Figura 5.20, os resultados dos testes, realizados nas amostras AA 6082 N, AA 7075 N1 e AA 7075 N2.



Figura 5.20: Resultados do Teste de Adesão: a) AA 6082 N, b) AA 7075 N1, c) AA 7075 N2

Com a realização do teste de adesão é possível classificar todas as amostras como conformes, uma vez que não se verificou nenhuma alteração ao nível do revestimento, como o seu descolamento/arrancamento. Apesar de se tratar de um teste qualitativo, permite mais uma vez aferir o comportamento do revestimento, quando aplicado na liga 7075, demonstrando a aptidão da mesma para o processo produtivo em questão.

5.7 Ensaio de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados em amostras, obtidas a partir de chapa cortada e revestida (tal como descrito no procedimento apresentado no Subcapítulo 3.2.3), tendo sido referenciadas com **6082-1**, **6082-2**, **7075-1** e **7075-2** (correspondendo a dois exemplares de cada material). Atendendo ao número reduzido de amostras disponíveis, optou-se pela realização de ensaios nas duas faces de cada amostra, aumentando assim o número de ensaios realizados.

Os parâmetros gerais de ensaio (comuns a todos os testes realizados) foram baseados em [25], apresentando-se seguidamente:

- Velocidade de rotação do motor: $\omega_M = 700$ rpm;
- Velocidade de rotação da mesa: $\omega_P = 100$ rpm;
- Diâmetro da pista: 0,02 m;
- Caudal de Azoto: ~ 3 l/min.

A velocidade de rotação da mesa (ω_P), foi calculada através do valor da relação de transmissão ($i = 7$). Com a determinação deste valor, calculou-se ainda o valor da velocidade linear (v_P) verificado no ensaio, apresentado na Equação 5.1.

$$v_P = \omega_P \times r \times \frac{2\pi}{60} = 0,1 \text{ m/s} \quad (5.1)$$

Para a realização dos ensaios, foram sucessivamente alterados os parâmetros de carga normal aplicada (ou seja, a carga vertical aplicada no pino de desgaste, através de Pesos) e ainda o período de teste, com o objetivo de avaliar o comportamento do revestimento de Ni-P.

Foram então realizados um total de dez ensaios (cinco para cada liga em estudo), apresentando-se, na Tabela 5.3, os parâmetros de teste utilizados, nomeadamente o período, a distância percorrida e carga normal aplicada, bem como o valor de massa inicial e final.

Tabela 5.3: Parâmetros de teste e resultados dos Ensaios de Desgaste.

Amostra	Período (min)	Carga Normal (N)	Distância (m)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)
6082-1	125	19,7	785	26,5217	26,5170
6082-1	125+125	19,7	1570	26,5170	26,5104
6082-1 Verso	50	4,9	314	26,3107	26,3102
6082-2	250	9,9	1570	26,2392	26,2337
6082-2 Verso	15	4,9	94,2	26,2334	26,2333
7075-1	125	19,7	785	23,9348	23,9301
7075-1	125+125	19,7	1570	23,9301	23,9271
7075-1 Verso	50	4,9	314	23,7415	23,7411
7075-2	250	9,9	1570	NR	NR
7075-2 Verso	15	4,9	94,2	23,4178	23,4175

Após a realização dos ensaios e elaboração de uma análise preliminar, com recurso a microscopia óptica, foi possível concluir que, nos ensaios com períodos superiores a 50 min de duração, para qualquer valor de carga aplicada, não seria possível a análise do comportamento do revestimento, uma vez que o desgaste verificado havia sido suficiente para se atingir o substrato (como se apresenta na Figura 5.21).

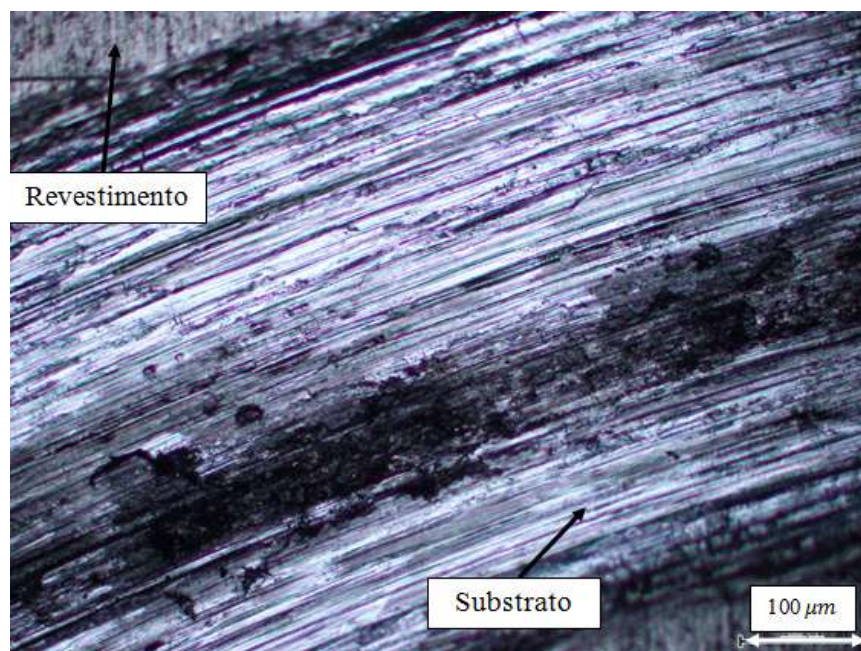


Figura 5.21: Ensaio realizado na liga 7075, por um período de 125 min.

Na Figura 5.21 é possível identificar a pista de desgaste, onde apenas se distingue a presença do substrato, não permitindo a análise do comportamento do revestimento quando sujeito à condição de desgaste. Serão então apresentados e discutidos somente os resultados referentes aos ensaios realizados por um período de 15 e 50 min, respetivamente. Não será igualmente analisada a diferença de massa verificada após a realização do ensaio, devido à

impossibilidade de calcular o volume perdido (a que corresponderia o desgaste efetivo), pois não é conhecido o valor da densidade do revestimento.

Apresentam-se os resultados do ensaio realizado na **liga 6082**, por um período de **15 min**. Na Figura 5.22 é possível verificar o comportamento do revestimento Ni-P quando sujeito ao fenómeno de desgaste.



Figura 5.22: Ensaio realizado na liga 6082, por um período de 15 min.

Ao analisar a Figura 5.22 é possível distinguir a pista de desgaste, verificando-se ainda que esta é composta apenas pelo revestimento. A figura apresentada resume o comportamento do revestimento Ni-P ao longo de todo o perímetro, denotando, no local assinalado, o arrancamento de uma quantidade significativa de material, podendo este fenómeno ser verificado em vários outros locais, demonstrando assim um comportamento frágil.

Na Figura 5.23 apresentam-se os valores do coeficiente de atrito, aferidos durante o ensaio.

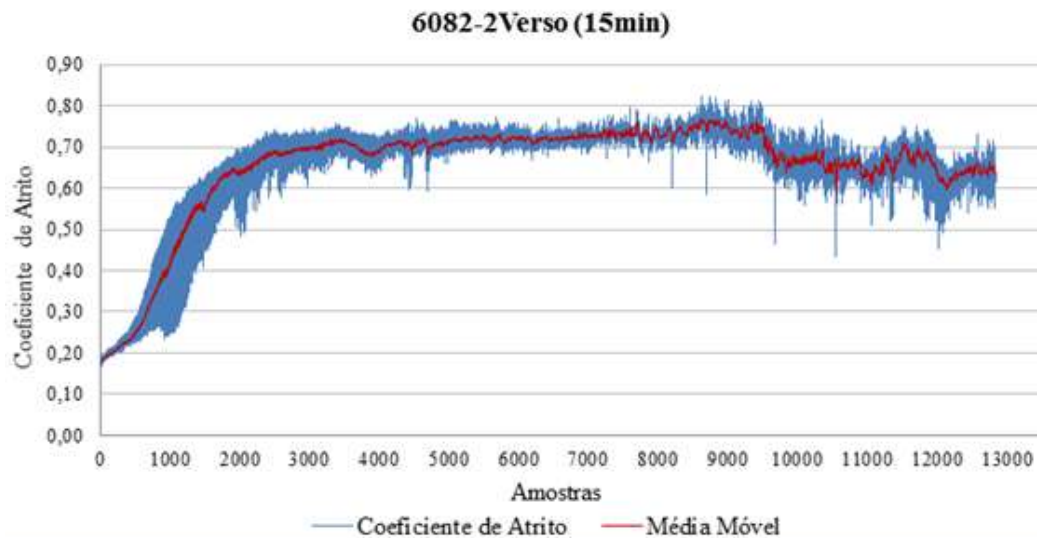


Figura 5.23: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 6082, por um período de 15 min.

Ao analisar o gráfico, onde está presente o valor de coeficiente de atrito e o valor da média móvel, verifica-se que, numa primeira fase este valor vai aumentando até se atingir a estabilidade do próprio ensaio, mantendo-se relativamente constante até próximo da amostra 9000. As oscilações verificadas a partir desse instante podem ser explicadas pelo aparecimento do fenómeno de oxidação na pista de desgaste (apesar de ter sido utilizada uma atmosfera de Azoto, com o intuito de localmente gerar uma atmosfera inerte), provocando assim a diminuição do coeficiente de atrito.

Apresenta-se em seguida, na Figura 5.24, o ensaio realizado pela **liga 7075**, durante o período de **15 min**.



Figura 5.24: Ensaio realizado na liga 7075 por um período de 15 min.

Em comparação com o ensaio realizado na liga 6082, é possível distinguir uma diferença de comportamento, não se verificando nenhuma ocorrência de arrancamento significativo de material, mas antes a remoção do revestimento por camadas. Tal como se encontra destacado na figura, a pista de desgaste apresentou o fenómeno de oxidação, o que ajuda a explicar a diminuição do valor do coeficiente de atrito, demonstrado pela Figura 5.25.

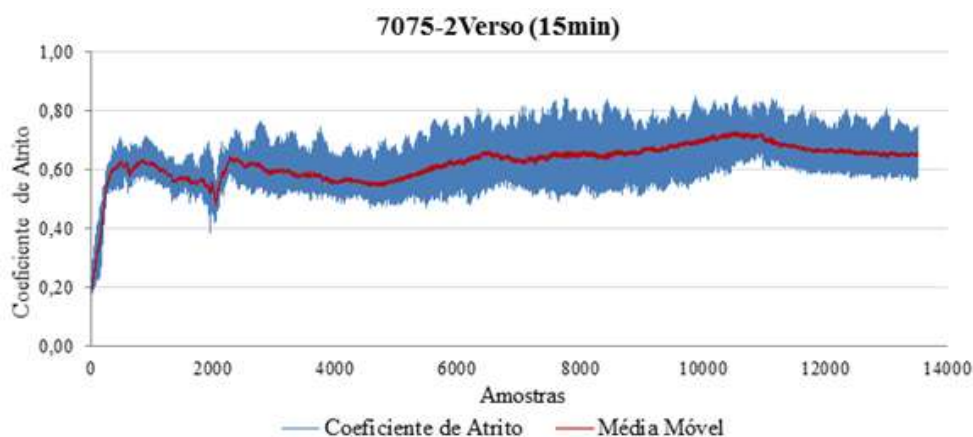


Figura 5.25: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 7075, por um período de 15 min.

Tal como havia sido referido, o aparecimento de óxidos na pista de desgaste possibilita a diminuição do valor do coeficiente de atrito, sendo assim justificada a diferença de valores verificada para os dois ensaios.

Relativamente ao ensaio realizado na **liga 6082**, por um período de **50 min**, apresenta-se na Figura 5.26, um exemplo demonstrativo do comportamento do revestimento.

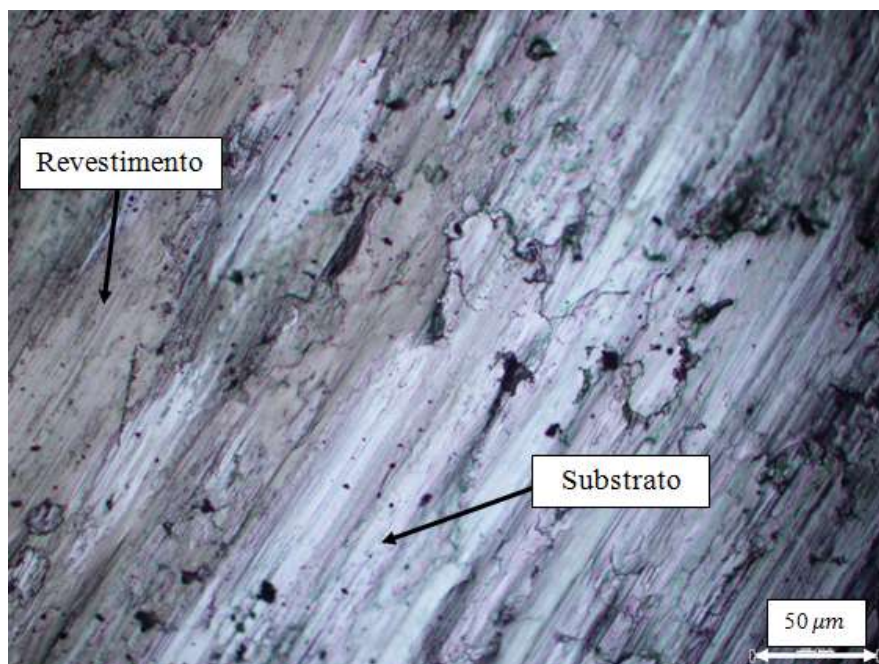


Figura 5.26: Ensaio realizado na liga 6082, por um período de 50 min.

É possível distinguir claramente as zonas onde está presente o substrato, tendo-se verificado uma situação semelhante ao longo de todo o perímetro, denotando que, para um ensaio realizado por um período de 50 min, por aplicação de uma carga normal de 4,9 N, a taxa de remoção de material é suficiente para que o revestimento seja removido quase por completo, atingindo assim o próprio substrato.

Na Figura 5.27 apresentam-se os valores de coeficiente de atrito para o referido ensaio.

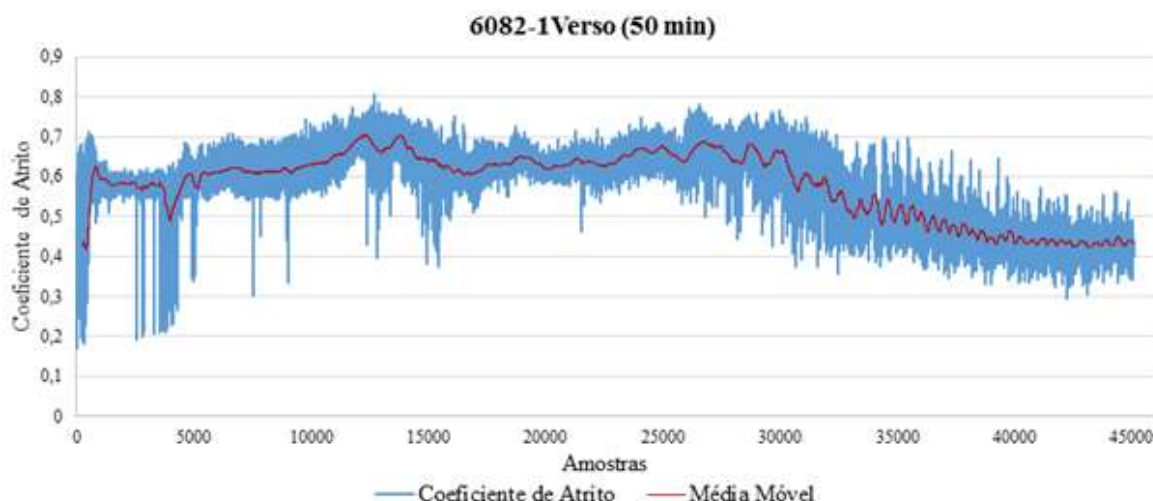


Figura 5.27: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 6082, por um período de 50 min.

O gráfico apresentado, demonstra que, a partir da amostra 35000, possivelmente o desgaste já teria efeito somente no substrato, daí a variação apresentada nos valores do coeficiente de atrito.

Por último, são apresentados os resultados do ensaio realizado a uma amostra obtida a partir da **liga 7075**, por um período de **50 min**, ficando demonstrado na Figura 5.28, o comportamento do revestimento.

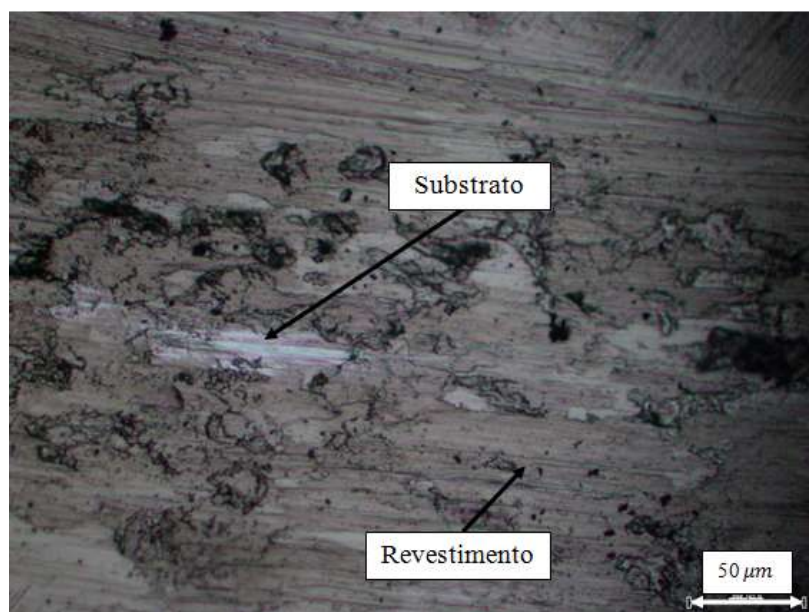


Figura 5.28: Ensaio realizado na liga 7075, por um período de 50 min.

Ao contrário da situação verificada para a liga 6082, a taxa de remoção de material não foi suficiente para eliminar a camada revestida, demonstrando assim que o revestimento Ni-P apresenta uma maior resistência ao desgaste quando depositado sobre um substrato de 7075. No entanto, pontualmente observam-se, tal como destacado na Figura 5.28, zonas em que o desgaste foi suficiente para alcançar o substrato.

Na Figura 5.29 apresentam-se os valores do coeficiente de atrito, para o ensaio realizado na amostra 7075-1.

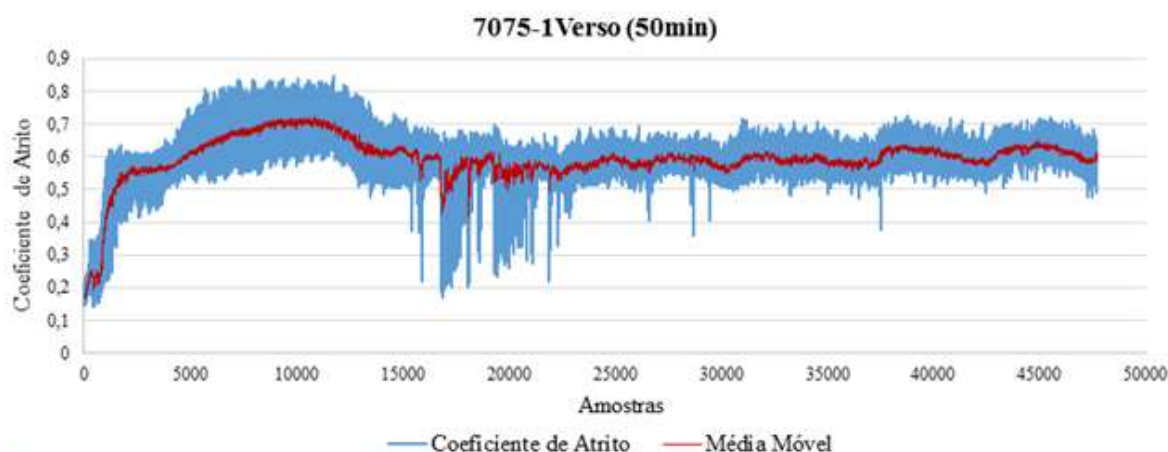


Figura 5.29: Valores do coeficiente de atrito do ensaio realizado na liga 7075, por um período de 50 min.

Analisando o gráfico, e comparando com o resultado obtido para a liga 6082, conclui-se que não existe nenhuma variação significativa dos valores do coeficiente de atrito, dando conta que o desgaste ocorreu apenas na camada revestida. Destacam-se os picos verificados entre as amostras 15000 e 20000, que podem ser justificados por vibrações ou oscilações do próprio equipamento, ou ainda pelo desgaste do pino e eventualmente por algum arraste de material removido.

Após análise e comparação dos resultados dos ensaios de desgaste é possível concluir que as amostras da liga 7075 apresentam maior resistência ao desgaste, sendo este o resultado esperado, uma vez que, não existe uma diferença de durezas significativa entre o revestimento e o substrato, permitindo a transmissão das tensões de corte, entre a camada revestida e o substrato, conferindo assim um comportamento mais resistivo ao desgaste. No que diz respeito à liga 6082, tal como havia sido apresentado, o substrato é mais macio do que o próprio revestimento, sendo deformado pela aplicação de carga realizada ao longo do ensaio, possibilitando assim o arrancamento do revestimento, devido à falta de suporte conferida pelo substrato.

É pertinente referir que, para melhor fundamentar as conclusões acima apresentadas, seria necessária a realização de um estudo mais aprofundado, através da realização de um maior número de ensaios, contemplando diferentes condições de teste, bem como a visualização das amostras recorrendo à tecnologia SEM, de modo a analisar a morfologia do revestimento após o fenómeno de desgaste.

5.8 Ensaio Ultramicrodureza

Os ensaios de ultramicrodureza foram realizados em amostras, obtidas a partir de chapa cortada e revestida (tal como o procedimento apresentado no Subcapítulo 3.2.3), uma vez que, não seria possível, atendendo à montagem experimental utilizada, a avaliação de dureza nos próprios OS. Apresentam-se assim, na Figura 5.30, as amostras em questão (de dimensões $45 \times 45 \text{ mm}$, e de espessura de 5 mm para 7075 e 6 mm para 6082), bem como um exemplo das indentações efetuadas.

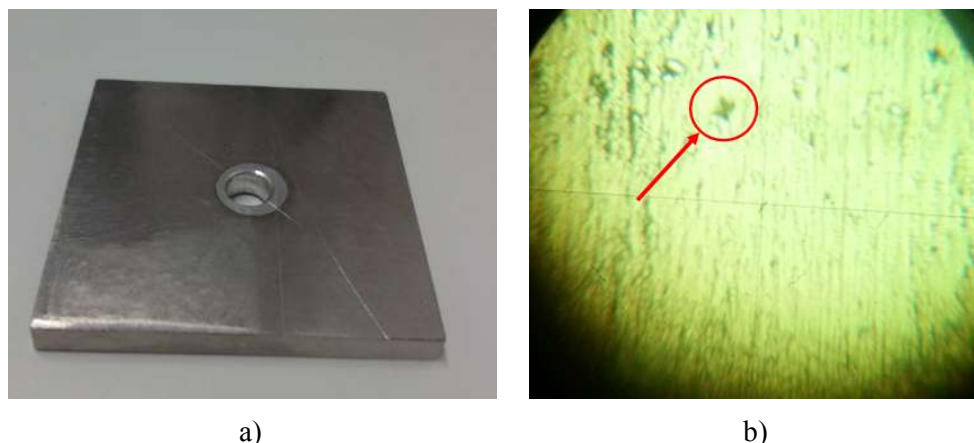


Figura 5.30: a) Amostra utilizada para os ensaios de ultramicrodureza, b) Exemplo de indentação realizada.

A apresentação dos resultados será dividida pelas cargas utilizadas nos ensaios (**1000 mN**, **500 mN** e **250 mN**, respetivamente), de modo a possibilitar a comparação entre os dois materiais quando sujeitos às mesmas condições de ensaio.

Relativamente à carga de **1000 mN**, apresenta-se na Tabela 5.4 os resultados obtidos, onde é possível aferir a profundidade máxima da indentação ($h_{máx}$), o valor de dureza (medido em GPa e convertido para a escala de *Vickers*) e ainda o módulo de *Young* (E).

Tabela 5.4: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 1000 mN.

Indentação	$h_{máx}(\mu m)$	H (GPa)	HV (kg/mm^2)	E (GPa)
6082-01	3,704	3,573	365	98,3
6082-02	4,053	2,917	298	88,6
7075-10	3,249	4,910	501	108,3
7075-11	3,165	5,136	524	117,2

É possível verificar que os valores $h_{máx}$ não respeitam a regra empírica enunciada no Subcapítulo 4.8, levando a que os valores de dureza obtidos tenham sido influenciados pelas características do substrato. Esta situação torna-se evidente ao verificar a disparidade entre os resultados dos dois materiais, sendo que as indentações realizadas na liga 7075 revelam valores de dureza muito superiores, devido às características do próprio material (tal como apresentado nos resultados presentes no Subcapítulo 5.2).

Apresenta-se na Tabela 5.5, os resultados dos ensaios realizados por aplicação da carga de 500 mN.

Tabela 5.5: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 500 mN.

Amostra	$h_{m\acute{a}x}(\mu m)$	H (GPa)	HV (kg/mm^2)	E (GPa)
6082-03	1,786	8,622	880	149,5
6082-04	2,232	5,096	520	113,2
6085-05	2,317	4,700	480	106,9
6082-06	1,958	6,911	705	133,3
7075-06	2,146	5,725	584	111
7075-07	2,019	6,514	665	124,1
7075-08	1,986	6,744	688	128,1
7075-09	2,103	5,919	604	118

Pela análise dos resultados, é possível verificar que, mais uma vez, os valores de $h_{m\acute{a}x}$ ultrapassam o valor definido empiricamente, levando a que o valor de dureza do substrato possa ter influência nos resultados obtidos para o revestimento. Apresenta-se ainda, na Figura 5.31, os valores de dureza verificados para os dois materiais.

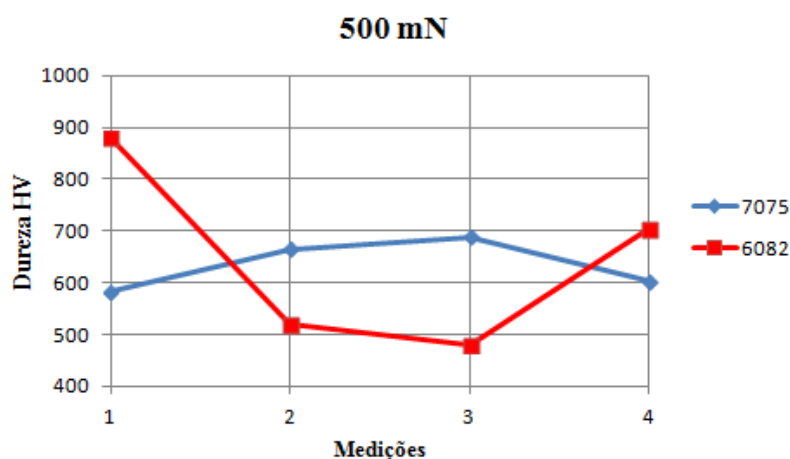


Figura 5.31: Gráfico da Dureza HV para a carga de 500 mN.

Através da análise do gráfico apresentado, é possível verificar a variabilidade entre os valores obtidos, podendo este ser explicado não só pela rugosidade superficial das amostras, mas também pelas variações de espessura ao longo do revestimento. Estes dois fatores induzem alterações no próprio ensaio, tal como se pode verificar pela relação entre a profundidade máxima de indentação e o valor de dureza correspondente, em que para valores mais elevados de dureza correspondem os menores valores de $h_{m\acute{a}x}$, indiciando que o revestimento possui dureza superior quando comparado com os substratos.

Já relativamente aos ensaios realizados por aplicação de uma carga de **250 mN**, apresentam-se, na Tabela 5.6 e na Figura 5.32, os resultados relativos aos mesmos.

Tabela 5.6: Resultados do ensaio de ultramicrodureza, para a carga de 250 mN.

Amostra	$h_{m\acute{a}x}(\mu m)$	H (GPa)	HV (kg/mm^2)	E (GPa)
6082-07	1,392	6,717	685	125,7
6082-08	1,221	9,082	927	151,0
6082-09	1,314	7,724	788	134,0
6082-10	1,314	7,601	776	138,7
6082-11	1,211	9,092	928	158,6
7075-01	1,354	7,184	733	129,3
7072-02	1,367	7,061	721	126,4
7075-03	1,316	7,700	786	133,6
7075-04	1,321	7,622	778	133,5
7075-05	1,479	5,848	597	116,1

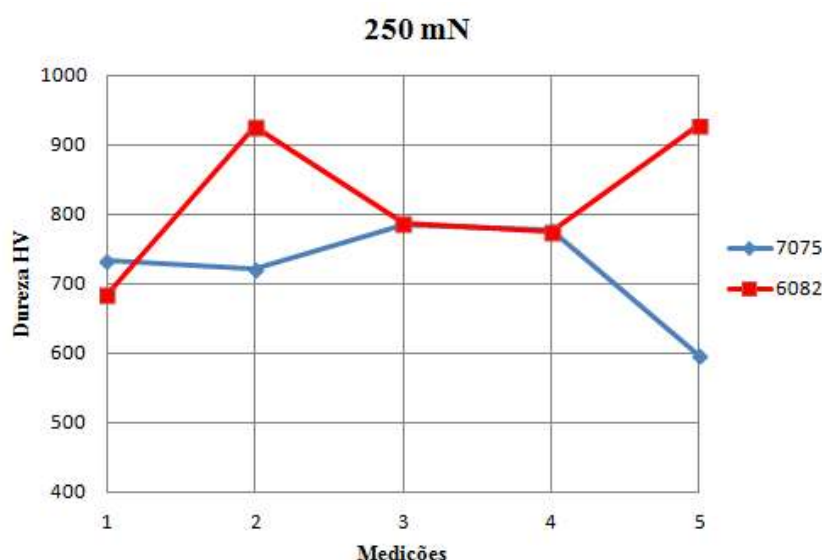


Figura 5.32: Gráfico da Dureza HV para a carga de 250 mN.

Conclui-se que os testes realizados por aplicação da carga de **250 mN** respeitam a regra relativa ao valor de $h_{m\acute{a}x}$, possibilitando que o valor de dureza obtido dependa exclusivamente das características do revestimento Ni-P, ainda que possa ser observada a influência da geometria do substrato. Verifica-se que os revestimentos aplicados sobre a liga 6082 apresentam valores de dureza superiores aos da liga 7075, e que, em termos médios, as indentações aplicadas às amostras de 6082 apresentam um valor de **820,8 HV**, enquanto para a liga 7075 denotam uma dureza média de **723 HV**. Esta diferença, apesar de não ser significativa, poderá ser explicada pelo facto de os parâmetros do processo de Niquelagem não se encontrarem otimizados para a liga 7075, evidenciando alterações no revestimento aplicado, que podem influenciar as propriedades mecânicas do próprio filme.

5.9 Ensaio *Scratch Test*

Os ensaios de *Scratch Test* foram realizados em amostras idênticas às apresentadas na Figura 5.30, tendo sido efetuadas quatro indentações por amostra, em diferentes direções, com o intuito de verificar se existia alguma influência relativamente à direção analisada. Apresenta-se assim, na Figura 5.33, uma das amostras utilizadas para o referido teste, destacando-se o posicionamento dos dois locais de teste (1 e 2).



Figura 5.33: Amostra de 7075 utilizada no *Scratch Test*.

Após terem sido realizadas as indentações nas amostras referentes às ligas 6082 e 7075, estas foram analisadas com recurso a microscopia ótica, de modo a poder visualizar em detalhe o estado do revestimento, nomeadamente o estado da adesão. É ainda de referir que as imagens recolhidas apresentam uma ampliação de 200 vezes.

Apresentam-se, na Figura 5.34 e Figura 5.35, as indentações realizadas nas amostras da liga **6082**, respetivamente para a localização 1 e 2. É de notar que as indentações deslizantes foram realizadas na direção vertical e no sentido ascendente.



Figura 5.34: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 6082, na localização 1.

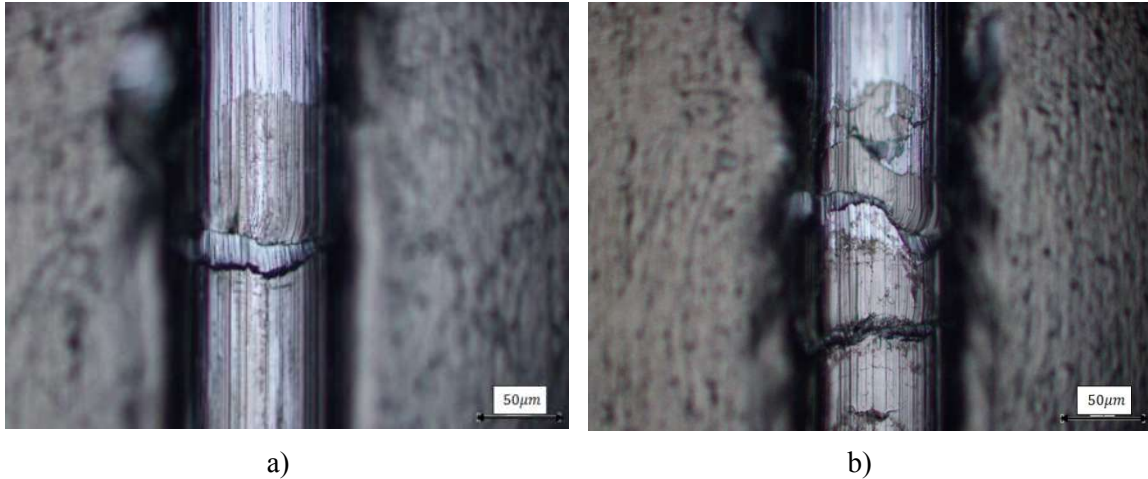


Figura 5.35: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 6082, na localização 2.

Através das imagens apresentadas, que representam pormenores das indentações deslizantes realizadas nas amostras (respetivamente **a)** para a indentação mais à esquerda e **b)** para a direita), é possível concluir que o revestimento aplicado sobre a liga 6082 apresenta um comportamento frágil, denotando em vários locais o seu arrancamento. O facto de o revestimento denotar, em certas zonas, o fenómeno de descolamento/arrancamento, pode ser explicado pela diferença de dureza apresentada entre este e o substrato (o revestimento apresenta dureza superior), conduzindo a que a liga 6082 apresente deformações, quando sujeita ao carregamento do teste, originando os problemas de adesão referidos.

Apresentam-se agora, na Figura 5.36 e Figura 5.37, as indentações realizadas nas amostras da liga **7075**, respetivamente para a localização **1** e **2**.

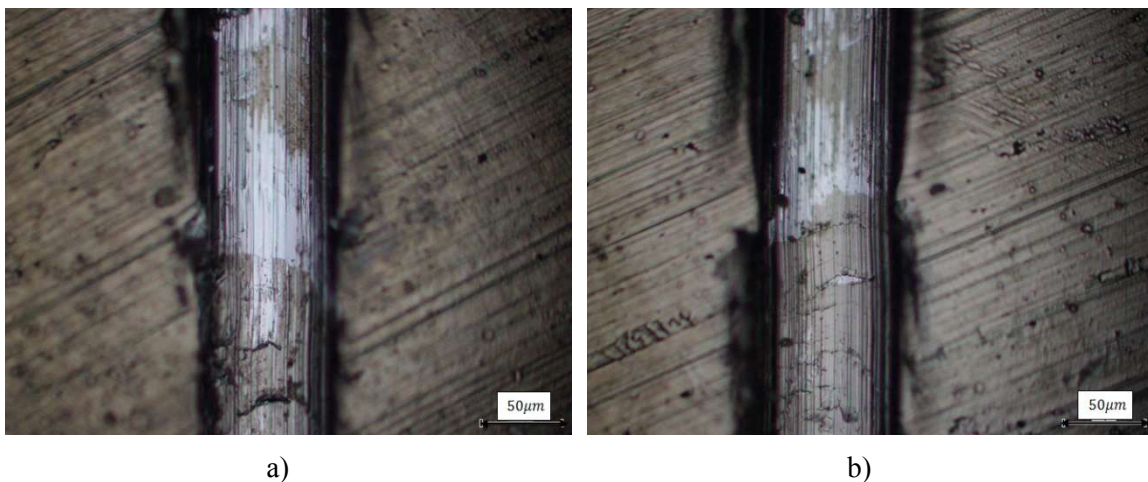


Figura 5.36: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 7075, na localização 1.

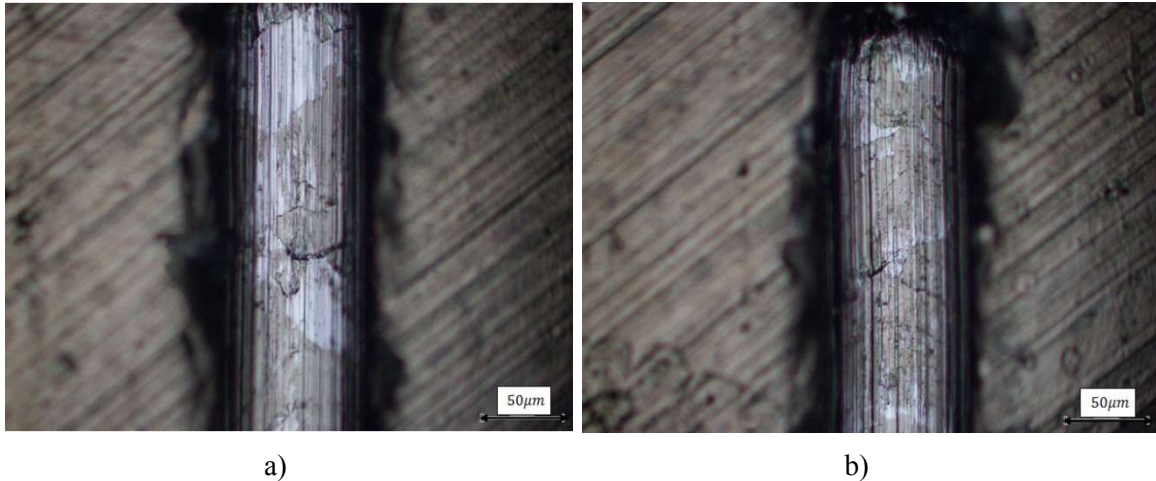


Figura 5.37: Pormenor das indentações realizadas na amostra da liga 7075, na localização 2.

É possível concluir que, para as amostras obtidas na liga 7075, não se verificou nenhum fenómeno de arrancamento do revestimento, constituindo assim uma melhoria de adesão, relativamente aos resultados obtidos para a liga 6082. Destaca-se ainda o facto de, na Figura 5.37 b), ser visível que o revestimento não sofreu qualquer tipo de alteração até se atingir o final da indentação. As alterações observáveis nessa figura correspondem ao facto de a profundidade final de indentação alcançar a interface (ou seja, na ordem de $10\ \mu m$), daí se verificar a ausência de revestimento em certos locais. Ao contrário do que sucede com a liga 6082, o revestimento Ni-P e o substrato de 7075 apresentam valores de dureza similares, logo o seu comportamento quando sujeitos à carga de teste será idêntico, explicando assim a boa adesão verificada.

Conclui-se então que, para a liga 7075, o revestimento denota uma boa adesão, não se tendo verificado qualquer fenómeno de arrancamento/deslocamento. Este resultado assume especial importância, uma vez que, demonstra um acréscimo na qualidade de adesão do revestimento, quando comparado com os resultados da liga 6082, suportando assim a sugestão de alteração do material-base.

6 Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

Neste trabalho propôs-se a elaboração de um estudo comparativo entre componentes de um compressor *Scroll* fabricados por dois materiais diferentes, destacando-se o facto de não se ter realizado qualquer alteração nos parâmetros de fabrico dos mesmos.

Após a análise e discussão dos resultados referentes aos ensaios realizados, é possível concluir que:

- A liga 7075 apresentou, para os ensaios realizados no Estado Maquinado, menores valores de rugosidade superficial e maior dureza, quando comparado com a liga 6082, denotando melhor prestação nas etapas de maquinagem;
- Os resultados dos testes referentes ao Estado Maquinado indicam que a utilização da liga 7075 poderá contribuir diretamente para a mitigação dos problemas verificados nesta etapa do processo produtivo, nomeadamente o desgaste precoce das ferramentas de corte;
- Para os ensaios realizados no Estado Final é possível verificar que a liga 7075 denotou melhores resultados, mesmo não se encontrando o processo produtivo otimizado para a sua utilização;
- No caso do FS produzido na liga 7075, quando sujeito ao processo de Anodização, demonstrou resultados muito semelhantes aos verificados pelos FS produzidos na liga 6082;
- Os resultados do ensaio de Desgaste revelaram que o revestimento Ni-P aplicado sobre a liga 7075 denotou uma maior resistência ao desgaste, devido à semelhança de comportamento, quando sujeitos à condição de desgaste, entre o revestimento e o substrato;
- Com a realização do ensaio *Scratch Test*, foi possível verificar um melhor comportamento do revestimento Ni-P, quando aplicado a um substrato composto pela liga 7075, denotando uma melhor adesão. Trata-se de uma melhoria significativa, uma vez que, a qualidade da adesão é um fator fundamental para a avaliação do estado dos revestimentos Ni-P;
- Com os resultados apresentados para o Estado Final, identifica-se o potencial de utilização da liga 7075, mesmo tendo em consideração que o processo de *Electroless* não se encontra otimizado para os elementos de liga deste material;

- A liga 7075 denota resultados superiores aos do material atualmente utilizado, destacando-se a melhor adesão e um comportamento mais resistente ao desgaste apresentado pelo revestimento. Estes resultados, bem como o facto de a utilização desta liga poder contribuir decisivamente para a eliminação dos problemas afetos às operações de maquinagem, revelam-se fortes indicadores para promover a alteração do material-base, atendendo às condições de utilização dos próprios componentes.

Ao não estar incluído no presente estudo a análise e otimização dos parâmetros utilizados no processo produtivo, propõe-se como sugestões de trabalho futuro:

- A execução de um ensaio operacional (em que os componentes são montados num compressor de teste), onde se simulam as condições em serviço. Seria assim possível avaliar o desgaste provocado pela interação entre o revestimento Ni-P (do OS) e a camada anodizada (do FS), correlacionando este comportamento com a utilização da liga 7075;
- Realização de um estudo para aferir os parâmetros de processo ótimos relativos às operações de maquinagem;
- Realização de um estudo pormenorizado sobre o processo de *Electroless*, de modo a conhecer os efeitos dos diferentes banhos e a sua influência nos elementos de liga do material em teste, para se proceder à otimização dos seus constituintes.

Bibliografia

- [1] W. F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais* - Terceira Edição, McGraw-Hill, 1998.
- [2] J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
- [3] I. J. Polmear, *Light Alloys From Traditional Alloys to Nanocrystals* - Fourth edition, Australia: Butterworth-Heinemann.
- [4] *ASM Handbook Volume 13A Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*, 2003.
- [5] LNEC, “Comportamento do Alumínio Anodizado à Corrosão Atmosférica - Influência do tipo de colmatagem,” Lisboa, 2004.
- [6] T. Santos, *Tecnologias de Enformação Plásticas - Forjamento*, Lisboa: FCT-UNL, 2014.
- [7] J. Rodrigues e P. Martins, *Tecnologia Mecânica Volume II*, Escolar Editora, 2010.
- [8] G. Mallory e J. Hadju, *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, American Electroplaters and Surface Finishers Society.
- [9] J. Sudagar, J. Lian e W. Sha, “Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 571, 2013.
- [10] M. Kutz, *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, William Andrew Publishing, 2005.
- [11] *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering*, 1994.
- [12] J. W. Diggle, C. Thomas e C. W. Goulding, “Anodic Oxide Films on Aluminum,” *Chem. Rev.*, vol. 69 (3), pp. 365-405, 1969.
- [13] “Halla Visteon Climate Control,” [Online]. Available: <http://www.hvccglobal.com/En>. [Acedido em 5 Fevereiro 2015].

- [14] J. Qiang, B. Peng e Z. Liu, “Dynamic model for the orbiting scroll based on the pressures in scroll chambers - Part I: Analytical modeling,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 1830-1849, 2013.
- [15] A. W. Brace e P. G. Sheasby, *The Technology of Anodizing Aluminum*, Technicopy Limited, 1979.
- [16] “Matweb - Datasheet Aluminum 6082-T6,” [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7. [Acedido em 23 Setembro 2014].
- [17] “Matweb - Datasheet Aluminum 2024-T6,” [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=ecf8530875cb4ded9675b827f77bfac5. [Acedido em 23 Setembro 2014].
- [18] “Matweb - Datasheet Aluminum 7075-T6,” [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d. [Acedido em 23 Setembro 2014].
- [19] V. Vitry e A. Sens, “Wear and corrosion resistance of heat treated and as-plated Duplex NiP/NiB coatings on 2024 aluminum alloys,” *Surface & Coatings Technology*, vol. 206, p. 3421–3427, 2012.
- [20] E. S. Puchi-Cabrera e C. Villalobos-Gutiérrez, “Fatigue behavior of a 7075-T6 aluminum alloy coated with an electroless Ni–P deposit,” *International Journal of Fatigue*, vol. 28, p. 1854–1866, 2006.
- [21] S. Mohan Kumar e R. Pramod, “Evaluation of Fracture Toughness and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 7075, T6 with Nickel Coating,” *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 178 – 185, 2014.
- [22] L. Gil e L. Jimenez, “Evaluation of the effect of Ni-P coating on the corrosion resistance of the aluminium 7075 T6 alloy,” *REVISTA DE METALURGIA*, vol. 44, pp. 63-73, 2008.
- [23] M. Vijayananda e R. Elansezhianb, “Effect of Different Pretreatments and Heat Treatment on Wear Properties of Electroless Ni-B Coatings on 7075-T6 Aluminum Alloy,” *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1707-1717, 2014.
- [24] R. Chang e K. A. Goldsby, *Química*, 11ª ed., McGraw-Hill, 2013.

- [25] D. Pereira, "Friction Surfacing of Aluminium Alloys," Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012.
- [26] J. M. Antunes, A. Cavaleiro e L. F. Menezes, "Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter," *Surface and Coating Technologi*, vol. 149, pp. 27-35, 2002.
- [27] J. Costa, "Estudo e Caracterização de Filmes Finos à base de Nitreto de Crómio.," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011.
- [28] M. Specialities. [Online]. Available: http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=2418. [Acedido em 07 09 2015].

Anexos

A1 - Classificação dos tipos de Encruamento

Tal como referido no Subcapítulo 2.1, as ligas de Alumínio encontram-se divididas entre ligas tratáveis e não tratáveis termicamente, assim as séries não tratáveis não podem ser endurecidas por precipitação, sendo apenas endurecíveis por deformação a frio. A base do processo de deformação a frio, vulgarmente denominado por Encruamento, consiste na deformação mecânica da estrutura cristalográfica, tendo em vista o aumento da resistência mecânica e diminuição da ductilidade da liga. A sua designação é feita recorrendo à letra H seguida de dois dígitos, encontrando-se apresentados na Tabela A 1 os diferentes tipos de Encruamento, bem como o significado do primeiro dígito [2].

Tabela A 1:Tipos de Encruamento. Adaptado de [2].

Tipo de Encruamento	Especificação do 1º dígito
H1x	Deformação a frio
H2x	Deformação a frio e recozimento parcial
H3x	Deformação a frio e estabilização

Descreve-se, ainda que de forma sumaria, o significado de cada tipo de Encruamento:

H1x - O grau de Encruamento é indicado pelo segundo dígito, variando entre ¼ endurecido (H12) e totalmente endurecido (H18), sendo obtido através de uma redução de área de aproximadamente 75%;

H2x - Os tratamentos variam entre ¼ endurecido e totalmente endurecido, resultando do recozimento parcial de materiais deformados a frio com resistência mecânica inicial maior do que a desejada, designando-se os diferentes graus por H22, H24, H26 e H28;

H3x – Tratamentos utilizados essencialmente em ligas Al-Mg amaciadas por envelhecimento, que são encruadas e posteriormente aquecidas a baixa temperatura, de modo a aumentar a ductilidade e a estabilizar as propriedades mecânicas. Os tratamentos são designados por H32, H34, H36 e H38, na sequência do que havia sido apresentado para **H1x** e **H2x**. [2].

A2 - Classificação dos tipos de Tratamentos Térmicos

As ligas de Alumínio passíveis de serem tratadas termicamente correspondem às séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e 8xxx, passando a ser classificadas com a letra T seguida por um ou mais dígitos, tal como se apresenta na Tabela A 2, onde além da classificação se encontra uma breve descrição acerca dos diversos tratamentos térmicos.

Tabela A 2:Tipos de Tratamentos Térmicos. Adaptado de [2].

Tipo de Tratamento	Descrição do Tratamento
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

É de referir que a designação pode recorrer a dois ou mais dígitos, em que estes se encontram relacionados com a diminuição de espessura por deformação plástica (como por exemplo, T85 significa que foi deformado a frio, como uma redução de 5% da sua espessura) ou com o tipo de alívio de tensões praticado (Tx51 refere-se a alívio de tensões por tração; Tx52 a alívio de tensões por compressão; Tx53 alívio de tensões por tratamento térmico) [2].

A3 - Endurecimento por Precipitação

O Endurecimento por Precipitação trata-se de um processo cristalográfico, aplicável a ligas tratáveis termicamente, que tem como objetivo a promoção da formação de uma dispersão, densa e fina, de partículas de precipitados numa matriz metálica deformável, tirando partido do facto das partículas dos precipitados atuarem como obstáculos ao movimento das deslocações, fazendo assim aumentar a resistência mecânica dessa mesma liga.

Para que uma liga possa ser alvo deste processo tem que estar presente uma solução sólida terminal, cuja solubilidade decresça com a diminuição da temperatura. Apresenta-se então os passos que envolvem o processo de endurecimento por precipitação:

- 1- **Tratamento térmico de solubilização:** ou simplesmente denominado de solubilização, trata-se da etapa em que a liga a tratar é aquecida e mantida a uma temperatura entre a temperatura do estado *solvus* e *solidus*, até que se forme uma estrutura uniforme de solução sólida;
- 2- **Têmpera:** durante este passo o componente ou amostra a tratar é rapidamente arrefecido após a solubilização, geralmente até à temperatura ambiente, para que a estrutura da liga, após têmpera, consista numa solução sólida sobressaturada;
- 3- **Envelhecimento:** o envelhecimento da amostra solubilizada e temperada é necessário para que possa ocorrer a formação de precipitados finos e dispersos, que se trata do objetivo último do processo de endurecimento por precipitação, uma vez que estes impedem o movimento das deslocações durante processos de deformação, aumentando assim a resistência mecânica da liga [1] [3].

A4 – Ensaio de Rugosidade Estado Maquinado

Tabela A 3: Resultados Ensaio de Rugosidade para o Estado Maquinado na amostra AA 6082 M.

AA 6082 M								
	RADIAL				TRANSVERSAL			
		Medições	Média	Desvio P.		Medições	Média	Desvio P.
	Ra1	0,50	0,48	0,04	Ra1	0,26	0,26	0,01
		0,52						
		0,52						
		0,44						
		0,44						
	Ra2	0,46	0,44	0,03	Ra2	0,26		
		0,45						
		0,47						
		0,41						
		0,40						
	Ra3	0,49	0,52	0,08	Ra3	0,26		
		0,47						
		0,52						
		0,65						
0,47								
Ra4	0,36	0,35	0,02	Ra4	0,27			
	0,37							
	0,36							
	0,32							
	0,32							
Ra5	0,31	0,37	0,04	Ra5	0,26			
	0,41							
	0,39							
	0,38							
	0,38							
RaR		0,43						

Legenda:

Pior

Melhor

Legenda: Pior
 Melhor

Tabela A 4: Resultados Ensaio de Rugosidade para o Estado Maquinado na amostra AA 7075 M.

AA 7075 M			
RADIAL			
	Medições	Média	Desvio P.
Ra1	0,46	0,36	0,06
	0,34		
	0,34		
	0,33		
	0,33		
Ra2	0,36	0,43	0,05
	0,39		
	0,49		
	0,46		
	0,45		
Ra3	0,43	0,46	0,02
	0,46		
	0,47		
	0,46		
	0,46		
Ra4	0,48	0,50	0,02
	0,52		
	0,51		
	0,49		
	0,49		
Ra5	0,38	0,37	0,03
	0,41		
	0,37		
	0,35		
	0,32		
RaR		0,42	

TRANSVERSAL			
	Medições	Média	Desvio P.
Ra1	0,22	0,22	0,01
	0,22		
	0,22		
	0,21		
	0,21		

Legenda:

Pior

Melhor

A5 – Ensaio de Rugosidade Estado Final

Tabela A 5: Resultados Ensaio de Rugosidade para o Estado Final na amostra AA 6082 N.

AA 6082 N													
	RADIAL			Desvio P.									
	Ra1	0,56 0,5 0,47 0,52 0,46	0,50		0,04								
		Ra2		0,34 0,35 0,35 0,32 0,33		0,34	0,01						
				Ra3				0,39 0,33 0,31 0,29 0,28	0,32	0,04			
								Ra4			0,29 0,26 0,3 0,31 0,27	0,29	0,02
											Ra5		
	RaR		0,36										
	TRANSVERSAL				Desvio P.								
	Ra1	0,24 0,23 0,22 0,25 0,25	0,24	0,01									

Legenda:

Pior

Intermédio

Melhor

Tabela A 6: Resultados Ensaio de Rugosidade para o Estado Final na amostra AA 7075 N1.

AA 7075 N1																
	RADIAL			Desvio P.												
	Ra1	0,7 0,88 0,9 0,87 0,87	0,84		0,08											
		Ra2		0,68 0,65 0,65 0,65 0,49		0,62	0,08									
				Ra3				0,47 0,39 0,35 0,38 0,4	0,40	0,04						
								Ra4			0,47 0,49 0,49 0,45 0,61	0,50	0,06			
											Ra5			0,62 0,55 0,51 0,41 0,42	0,50	0,09
	RaR		0,57													
	TRANSVERSAL				Desvio P.											
	Ra1	0,37 0,36 0,37 0,36 0,36	0,36	0,01												

Tabela A 7: Resultados Ensaio de Rugosidade para o Estado Final na amostra AA 7075 N2.

AA 7075 N2			
RADIAL			Desvio P.
Ra1	0,38	0,42	0,05
	0,4		
	0,37		
	0,44		
	0,5		
Ra2	0,77	0,66	0,09
	0,74		
	0,62		
	0,59		
	0,59		
Ra3	0,77	0,70	0,05
	0,67		
	0,65		
	0,7		
	0,73		
Ra4	0,46	0,42	0,03
	0,44		
	0,38		
	0,4		
	0,43		
Ra5	0,43	0,38	0,03
	0,4		
	0,36		
	0,37		
	0,35		
RaR		0,52	

TRANSVERSAL			Desvio P.
Ra1	0,4	0,40	0,01
	0,39		
	0,41		
	0,41		
	0,41		

Legenda:

	Pior
	Intermédio
	Melhor

A6 – Ensaio de Macro dureza HRB Estado Maquinado

Tabela A 8: Resultados Ensaio de Macro dureza para o Estado Maquinado.

AA 6082 M			
Ra	LATERAL		Desvio P.
	Medições	Média	
	62,0	57,5	
	52,9		
	62,9		
	48,0		
	61,9		
Ra	BASE		Desvio P.
	Medições	Média	
	61,0	61,6	
	61,8		
	61,5		
	62,0		
	61,5		
Ra	TOPO		Desvio P.
	Medições	Média	
	62,0	61,4	
	63,0		
	62,5		
	60,0		
	59,5		

AA 7075 M			
Ra	LATERAL		Desvio P.
	Medições	Média	
	81,0	79,6	
	82,0		
	79,0		
	77,5		
	72,5		
	87,0		
	75,0		
82,5			
Ra	BASE		Desvio P.
	Medições	Média	
	90,0	90,1	
	92,0		
	89,3		
	90,0		
	89,0		
Ra	TOPO		Desvio P.
	Medições	Média	
	91,0	89,5	
	88,5		
	90,0		
	89,0		
	89,0		

A7 – Programa em *Labview* para aquisição de dados do ensaio de desgaste

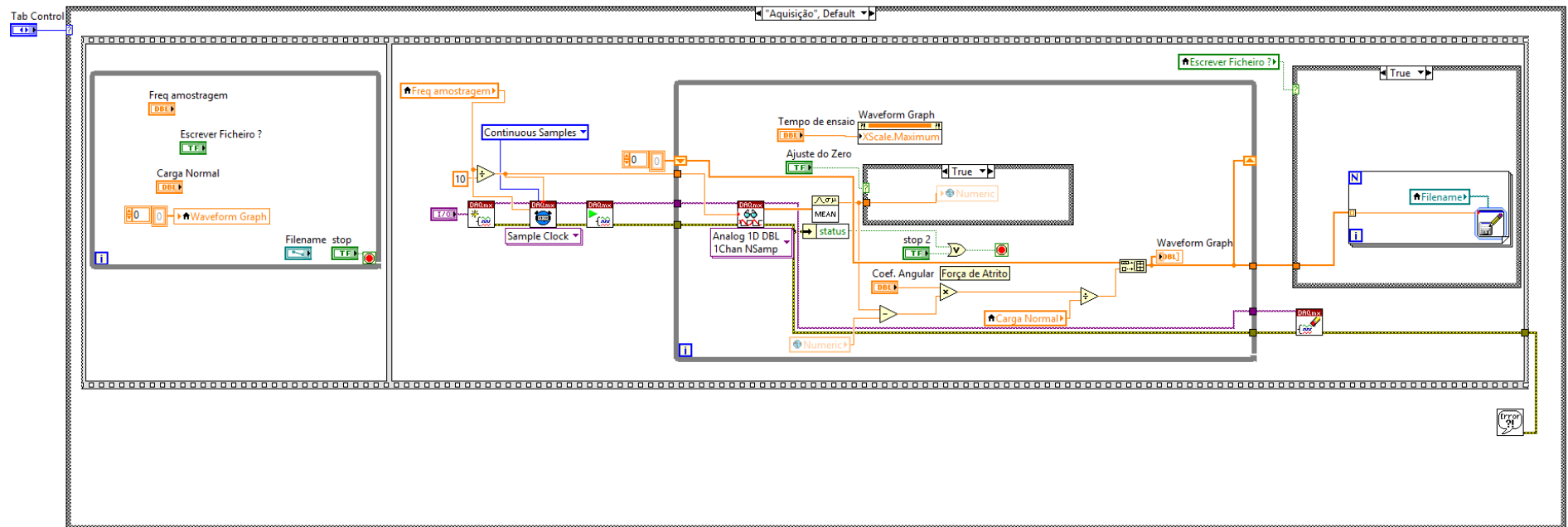


Figura A 1: Programa *Labview* para aquisição de dados.

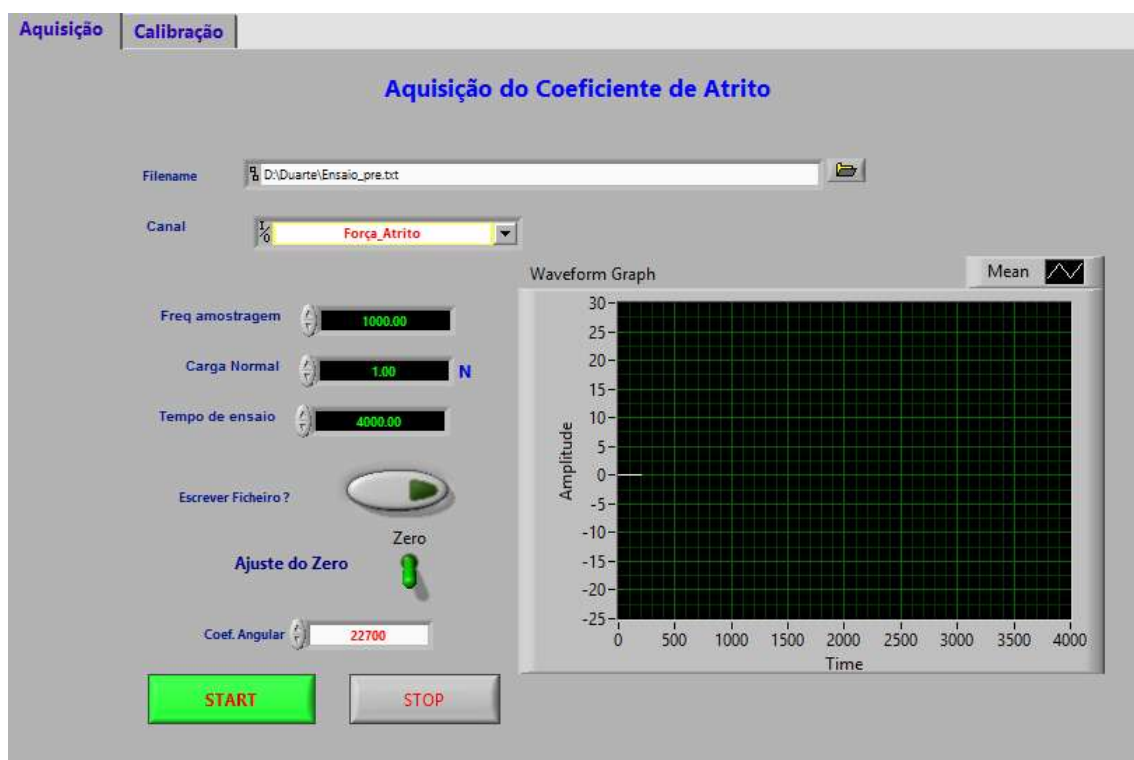



Figura A 2: Interface do programa *Labview*.

A8 – Características do Sensor de Carga



ELAF Load Cell

STANDARD RANGES

Lbf	N	Body Style
10L	50N	B0, T1
25L	125N	B0, T1
50L	250N	B0, T1
100L	500N	B0, T1
250L	1250N	B0, T2
500L	2500N	B0, T2
1000L	5KN	B1,
2000L	10KN	B2

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Supply Voltage: 5V

Ambient Temperature: 25°C (unless otherwise specified)

PARAMETERS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Recommended Excitation (mV Output)		5		V	
Recommended Excitation (Amplified)	4.75	5	6.25	V	
Zero Output (mV Output)		0mV ± 5% FSO			
Zero Output (Amplified)		0.5V ± 3% FSO			
Output Span (mV Output)		20mV/V ± 5% FSO			5V Supply
		20mV/V ± 5% FSO			2.5 Supply
		10mV/V ± 5% FSO			10V Supply
Output Span (Amplified)		4V ± 3% FSO			Ratiometric to Supply Voltage
Non-Linearity	-0.25		0.25	%FSO	
Hysteresis	-0.25		0.25	%FSO	
Thermal Zero Shift	-0.03		0.03	%FSO/ °C	Reference to 25°C
Thermal Sensitivity Shift	-0.03		0.03	%FSO / °C	Reference to 25°C
Maximum Over Load		250		%FSO	
Humidity	0		95	%RH	Non-Condensing
Deflection			0.05	MM	At Rated Load
Impedance In (mV Output)	2.5	3.0	3.5	KΩ	
Impedance Out (mV Output)	1.7	2.2	2.7	KΩ	
Operating Temperature	-40		+120	°C	
Compensated Temperature	20		80	°C	Other Options Available
Insulation Resistance (250Vdc)	50			MΩ	
Weatherproof		IP65			

Additional Notes

1. Cable: FEP/PTFE Shielded 34# AWG.
2. Body: Stainless Steel

Figura A 3: Especificações técnicas do sensor de carga. Adaptado de [28].

ELAF Load Cell

COMPRESSION & TENSION FORCE

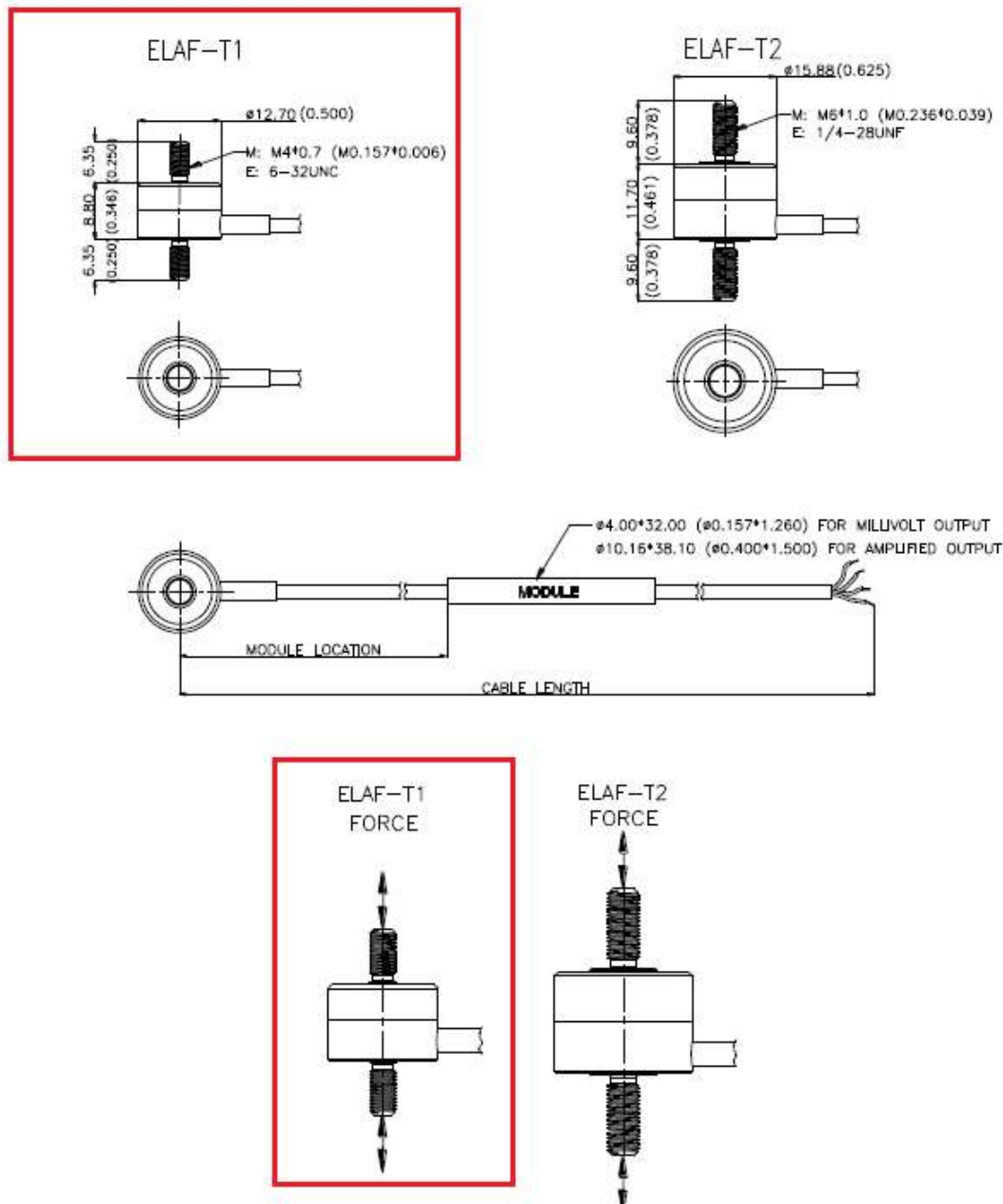


Figura A 4: Especificações dimensionais do sensor de carga. Adaptado de [28].